CAD/CAM/CAE

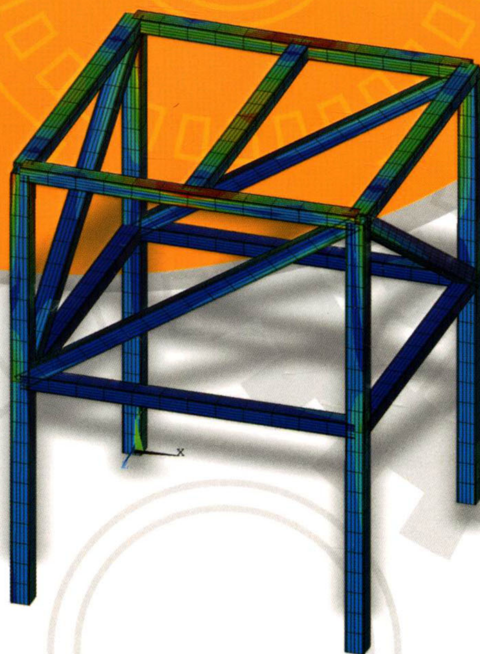
工程应用丛书

ANSYS系列

ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通

第2版

CAE应用联盟 组编　张　岩　等编著







关注机械工业出版社计算机分社官方微信订阅号“IT有得聊”，即可获得本书配套资源，包含全部案例的模型文件和结果文件。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

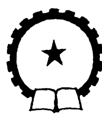
CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通

第 2 版

CAE 应用联盟　组编

张岩等　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书详细介绍了 ANSYS Workbench 17.0 的功能及应用。通过学习本书，读者能掌握该软件的操作，领悟解决工程领域相关实际问题的思路与方法。

本书分基础知识、基础专题应用及拓展专题应用 3 部分共 26 章进行讲解。第 1～5 章讲解 ANSYS Workbench 的基础知识，包括 Workbench 平台、工程数据模块、建模模块、网格划分 Meshing 和仿真计算模块、Mechanical 应用等；第 6～13 章为基础专题应用部分，依托工程中常见的案例，按照不同的分析方式，分层次、分类别进行讲解，包括结构静力学分析（包括线性及非线性静力分析）、接触分析、结构动力学分析（包括特征值分析、瞬态等分析、模态、谐响应、响应谱）等；第 14～26 章为拓展专题应用，以专题的形式对有限元分析拓展应用类型进行了示例讲解，包括随机振动分析、显式动力学分析、刚体运动学分析、垫片分析、疲劳分析、断裂分析、模型的简化分析、子模型分析、热分析、流场分析、静磁场分析、多物理场耦合分析和优化设计分析的操作方法等，具有非常重要的参考价值。

本书适合理工类院校土木工程、机械工程、力学、电子工程等相关专业的高年级本科生、研究生及教师使用，也可作为相关领域工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通 / CAE 应用联盟组编；张岩等编著. —2 版. —北京：机械工业出版社，2017.5
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-57712-6

Ⅰ. ①A…　Ⅱ. ①C…　②张…　Ⅲ. ①有限元分析－应用软件
Ⅳ. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 195479 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦　　责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞　　责任印制：李　昂

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 9 月第 2 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 27.25 印张 • 665 千字
0001－3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-57712-6
定价：85.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：（010）88361066
读者购书热线：（010）68326294
（010）88379203

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　言

自 ANSYS 7.0 开始，ANSYS 公司便开始推出 ANSYS 经典版和 ANSYS Workbench 版两个版本。Workbench 是 ANSYS 公司推出的协同仿真环境，可以解决企业产品研发过程中 CAE 软件的异构问题。

ANSYS Workbench 为有限元分析提供了强大的处理工具。目前，ANSYS 已经在很多领域成功应用。本书针对 ANSYS Workbench 在相关领域的应用，以 ANSYS Workbench 17.0 为工具，以引导读者掌握 ANSYS Workbench 的使用方法为目的进行编写。

1．本书特点

- 由浅入深、循序渐进：本书以初中级读者为对象，首先从 ANSYS Workbench 使用基础讲起，再辅以 ANSYS Workbench 在工程中的代表案例，全面介绍了使用其进行常见有限元分析的步骤。
- 步骤详尽、内容新颖：本书结合作者多年 ANSYS Workbench 使用经验，通过实际工程应用案例，将 ANSYS Workbench 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。
- 示例典型、轻松易学：学习分析案例的具体操作是掌握 ANSYS Workbench 最好的方式。本书通过综合应用案例，透彻详尽地讲解了 ANSYS Workbench 在各方面的应用。

2．本书内容

本书分基础知识、基础专题应用及拓展专题应用 3 部分共 26 章进行讲解，其中第 1～5 章为基础知识部分，第 6～13 章为基础专题应用部分，第 14～26 章为拓展专题应用部分，即本书的重点。其中：

第一部分：基础知识部分是使用 ANSYS Workbench 的基础，建议读者在学习后续有关分析过程时经常参考该部分的内容，以掌握基础操作步骤。本部分的章节安排如下。

第 1 章　ANSYS Workbench 介绍　　第 2 章　工程数据
第 3 章　几何建模　　第 4 章　网格划分
第 5 章　Mechanical 介绍

第二部分：基础专题应用部分以常见的有限元应用为基础，对有限元分析常见的类型进行了示例讲解，确保读者能参照这些示例对常见的分析进行设置，并正确分析。本部分的章节安排如下。

第 6 章　线性静力分析　　第 7 章　非线性静力分析
第 8 章　接触分析　　第 9 章　特征值分析
第 10 章　瞬态分析　　第 11 章　模态分析
第 12 章　谐响应分析　　第 13 章　响应谱分析

第三部分：拓展专题应用部分以专题的形式对有限元分析拓展应用类型进行了示例讲解，读者可以根据自己的实际工作需要选择相应的章节进行学习。本部分的章节安排如下。

第 14 章　随机振动分析
第 15 章　显式动力学分析
第 16 章　刚体运动学分析
第 17 章　垫片分析
第 18 章　疲劳分析
第 19 章　断裂分析
第 20 章　模型的简化分析
第 21 章　子模型分析
第 22 章　热分析
第 23 章　流场分析
第 24 章　静磁场分析
第 25 章　多物理场耦合分析
第 26 章　优化设计分析

本书以软件的工程应用为主，偏重于讲解软件的使用方法。因此，专题应用中的每个案例都根据实际工程应用做了简化，以方便读者掌握软件的使用方法。

提示：本书附赠网盘资源包括书中各案例所用到的素材源文件以及求解结果文件，以方便读者学习使用。

3．读者对象

本书既适用于 ANSYS Workbench 初学者，又适用于有一定基础的工程技术人员，具体包括：

- 初学 ANSYS Workbench 的工程技术人员
- 相关培训机构的教师和学员
- 大中专院校的教师和在校生
- ANSYS Workbench 有限元分析爱好者
- 参加工作实习的新手
- 初中级 ANSYS Workbench 从业人员
- 广大科研工作人员

4．读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者在学习过程中如遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 http://blog.sina.com.cn/caxart，编者会尽快给予解答。

5．编者团队

本书主要由张岩编写，参与编写的还有丁金滨、石良臣、林金宝、张亮亮、高飞、李昕、唐宗鹏、凌桂龙、王芳、韩希强、孙国强、于苍海、温正、陈艳霞、郭海霞、张建伟、刘成柱、宋玉旺、沈再阳、陈峰浩、张文电、丁凯、王菁和李战芬。

虽然编者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

最后，希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

编　者

目　　录

出版说明
前言
第 1 章　ANSYS Workbench 介绍……**1**
1.1　软件概述……**1**
1.2　软件界面……**1**
1.3　Workbench 项目工程图……**2**
1.3.1　项目工程图组成……**3**
1.3.2　项目工程图基本操作……**5**
1.3.3　常见项目工程图……**6**
1.4　ANSYS Workbench 分析项目管理……**7**
1.4.1　项目文件夹……**7**
1.4.2　文件与项目……**9**
1.4.3　项目文件管理注意事项……**9**
1.4.4　ANSYS Workbench 文件……**10**
1.4.5　导入历史数据库……**10**
1.4.6　日志……**11**
1.4.7　项目报告……**12**
1.5　使用帮助……**13**
1.6　本章小结……**14**
第 2 章　工程数据……**15**
2.1　工程数据应用……**15**
2.1.1　Engineering Data 应用概览……**15**
2.1.2　界面……**15**
2.1.3　工程数据源……**19**
2.1.4　材料数据……**19**
2.1.5　基本操作……**20**
2.2　材料数据……**20**
2.2.1　支持的材料属性……**20**
2.2.2　材料属性操作……**26**
2.3　本章小结……**26**
第 3 章　几何建模……**27**
3.1　Design Modeler 介绍……**27**
3.1.1　DM 概览……**27**
3.1.2　DM 界面……**28**
3.2　项目工程图操作……**33**
3.2.1　项目工程图中的 DM 和 CAD……**33**
3.2.2　项目工程图中的 DM 操作……**34**
3.2.3　项目工程图中的 DM 参数……**39**
3.3　二维绘图……**39**
3.3.1　草图与平面……**39**
3.3.2　自动约束……**40**
3.3.3　细节查看窗口……**40**
3.3.4　绘图工具箱……**41**
3.3.5　修改工具箱……**42**
3.3.6　尺寸工具箱……**43**
3.3.7　约束工具箱……**43**
3.3.8　设置工具箱……**44**
3.4　建模……**44**
3.4.1　体和零件……**44**
3.4.2　细节查看……**47**
3.4.3　布尔操作……**47**
3.4.4　三维特征……**49**
3.4.5　基本体……**54**
3.4.6　高级特征与工具……**55**
3.4.7　概念建模……**56**
3.5　DM 建模示例……**57**
3.5.1　进入 DM……**58**
3.5.2　草图绘制……**58**
3.5.3　三维建模……**62**
3.5.4　参数化……**65**
3.6　导入外部 CAD 模型……**67**
3.6.1　非关联性导入文件……**67**
3.6.2　关联性导入文件……**67**

3.6.3 导入定位 …… 68
3.6.4 创建场域几何体 …… 68
3.7 本章小结 …… 68
第 4 章 网格划分 …… 69
4.1 网格划分概述 …… 69
4.1.1 Workbench 中的网格划分 …… 69
4.1.2 网格划分算法类型 …… 70
4.2 网格划分控制 …… 71
4.2.1 网格划分方法 …… 71
4.2.2 网格划分命令 …… 73
4.2.3 全局网格控制 …… 73
4.2.4 局部网格控制 …… 79
4.2.5 虚拟拓扑工具 …… 82
4.3 网格划分示例 …… 82
4.3.1 自动网格划分案例 …… 82
4.3.2 网格划分控制案例 …… 86
4.4 CAD 模型划分示例 …… 93
4.5 本章小结 …… 95
第 5 章 Mechanical 介绍 …… 96
5.1 Mechanical 基础 …… 96
5.1.1 Mechanical 界面 …… 96
5.1.2 Mechanical 使用过程 …… 104
5.1.3 Mechanical 支持的分析 …… 108
5.2 Mechanical 使用 …… 108
5.2.1 设置材料属性 …… 108
5.2.2 设置几何模型 …… 111
5.2.3 设置坐标系 …… 122
5.2.4 定义连接 …… 123
5.2.5 分析求解设置 …… 126
5.2.6 设置边界条件 …… 130
5.2.7 结果处理 …… 133
5.3 本章小结 …… 134
第 6 章 线性静力分析 …… 135
6.1 线性静力分析概述 …… 135
6.1.1 应力–应变关系 …… 135
6.1.2 轴对称模型下的各向异性线性材料 …… 137
6.1.3 热膨胀系数 …… 137
6.2 线性静力分析过程 …… 138
6.2.1 过程概览 …… 138
6.2.2 结果处理 …… 138
6.3 线性静力分析示例 …… 140
6.3.1 问题描述 …… 140
6.3.2 建立分析项目 …… 141
6.3.3 导入几何体 …… 141
6.3.4 添加材料库 …… 142
6.3.5 添加模型材料属性 …… 146
6.3.6 划分网格 …… 147
6.3.7 施加载荷与约束 …… 149
6.3.8 结果后处理 …… 150
6.3.9 求解并显示结果 …… 152
6.3.10 更改材料观察分析结果 …… 153
6.3.11 保存与退出 …… 156
6.4 本章小结 …… 157
第 7 章 非线性静力分析 …… 158
7.1 概述 …… 158
7.1.1 几何非线性 …… 159
7.1.2 材料非线性 …… 160
7.2 非线性静力分析过程 …… 161
7.3 几何非线性静力分析示例 …… 163
7.3.1 前处理 …… 163
7.3.2 求解 …… 168
7.3.3 后处理与 B 项目 …… 169
7.4 材料非线性静力分析示例 …… 173
7.4.1 前处理 …… 173
7.4.2 求解 …… 179
7.4.3 后处理 …… 179
7.5 本章小结 …… 181
第 8 章 接触分析 …… 182
8.1 接触分析过程 …… 182
8.1.1 接触分析流程 …… 182
8.1.2 接触设置 …… 182
8.1.3 接触分析结果 …… 185
8.2 接触分析示例 …… 186

8.2.1 前处理……187
8.2.2 求解……192
8.2.3 后处理……192
8.3 本章小结……194
第 9 章 特征值分析……195
9.1 概述……195
9.2 特征值分析过程……196
9.2.1 线性特征值分析过程……196
9.2.2 非线性特征值分析过程……197
9.3 特征值分析示例……198
9.3.1 前处理……198
9.3.2 线性静力分析求解……201
9.3.3 线性特征值分析求解与后处理……201
9.3.4 非线性特征值分析求解与后处理……203
9.4 本章小结……208
第 10 章 瞬态分析……209
10.1 瞬态分析基础……209
10.1.1 瞬态分析概述……209
10.1.2 瞬态分析过程……211
10.2 瞬态分析示例……211
10.2.1 前处理……211
10.2.2 问题描述……211
10.2.3 基础操作……211
10.2.4 添加材料特性……212
10.2.5 创建坐标系……213
10.2.6 划分网格……214
10.2.7 施加载荷与约束……215
10.2.8 设置求解选项……216
10.2.9 求解并显示求解结果……219
10.2.10 保存与退出……223
10.3 本章小结……223
第 11 章 模态分析……224
11.1 模态分析基础……224
11.1.1 概述……224
11.1.2 模态分析过程……225
11.2 模态分析示例……225
11.2.1 问题描述……225
11.2.2 建立分析项目……226
11.2.3 导入几何体……226
11.2.4 添加材料库……227
11.2.5 修改模型材料属性……229
11.2.6 划分网格……230
11.2.7 施加固定约束……232
11.2.8 结果后处理……232
11.2.9 求解并显示求解结果……233
11.2.10 保存与退出……235
11.3 本章小结……235
第 12 章 谐响应分析……236
12.1 概述……236
12.1.1 谐响应概念……236
12.1.2 谐响应分析理论简介……236
12.2 谐响应分析的方法与过程……238
12.2.1 谐响应分析方法……238
12.2.2 谐响应分析过程……239
12.3 谐响应分析示例……240
12.3.1 前处理……240
12.3.2 模态分析……242
12.3.3 模态叠加法分析……242
12.3.4 完全法分析……246
12.4 本章小结……249
第 13 章 响应谱分析……250
13.1 响应谱分析基础……250
13.1.1 响应谱分析概述……250
13.1.2 响应谱分析流程……251
13.2 响应谱分析示例……251
13.2.1 前处理……251
13.2.2 模态分析……255
13.2.3 单点响应谱分析……257
13.2.4 多点响应谱分析……259
13.3 本章小结……262
第 14 章 随机振动分析……263
14.1 随机振动分析基础……263
14.1.1 随机振动分析概述……263
14.1.2 随机振动分析过程……263
14.2 随机振动分析示例……264

14.2.1　问题描述……264
14.2.2　建立分析项目……264
14.2.3　修改模型……265
14.2.4　生成多体部件体……268
14.2.5　划分网格……269
14.2.6　施加固定约束……272
14.2.7　提取模态参数设置……272
14.2.8　查看模态分析结果……273
14.2.9　添加功率谱位移……275
14.2.10　提取随机振动的分析结果……276
14.2.11　查看随机振动的分析结果……277
14.2.12　保存与退出……278
14.3　本章小结……279
第 15 章　显式动力学分析……280
15.1　显式动力学分析基础……280
15.1.1　显式动力学概述……280
15.1.2　显式动力学分析过程……280
15.2　显式动力学分析示例……281
15.2.1　前处理……281
15.2.2　求解……286
15.2.3　后处理……287
15.3　本章小结……289
第 16 章　刚体运动学分析……290
16.1　刚体运动学分析过程……290
16.1.1　刚体运动学分析过程概览……290
16.1.2　连接类型……290
16.2　刚体运动学示例……292
16.2.1　前处理……292
16.2.2　求解……295
16.2.3　后处理……296
16.3　本章小结……298
第 17 章　垫片分析……299
17.1　垫片分析过程……299
17.1.1　垫片分析概述……299
17.1.2　垫片分析流程……299
17.2　垫片分析示例……300
17.2.1　前处理……300
17.2.2　求解……305
17.2.3　后处理……305
17.3　本章小结……309
第 18 章　疲劳分析……310
18.1　疲劳分析过程……310
18.1.1　概述……310
18.1.2　疲劳分析流程……311
18.1.3　查看疲劳分析结果……312
18.2　疲劳分析示例……312
18.2.1　前处理……312
18.2.2　静力分析……316
18.2.3　疲劳分析……316
18.3　本章小结……318
第 19 章　断裂分析……319
19.1　断裂分析过程……319
19.1.1　断裂模式……319
19.1.2　断裂力学参数……320
19.1.3　断裂力学仿真方法……321
19.1.4　断裂分析流程……321
19.2　断裂分析示例……322
19.2.1　前处理……322
19.2.2　求解……327
19.2.3　后处理……327
19.3　本章小结……330
第 20 章　模型的简化分析……331
20.1　模型的简化分析基础……331
20.1.1　分析概览……331
20.1.2　简化模型……331
20.1.3　模型的简化分析流程……331
20.2　模型的简化分析示例……332
20.2.1　前处理……332
20.2.2　求解……335
20.2.3　后处理……335
20.3　本章小结……336
第 21 章　子模型分析……337
21.1　子模型分析基础……337
21.1.1　子模型概述……337
21.1.2　子模型分析流程……338

21.2 子模型分析示例……338
21.2.1 粗糙模型分析……339
21.2.2 子模型分析……342
21.3 本章小结……346
第 22 章 热分析……347
22.1 热分析基础……347
22.1.1 单位……347
22.1.2 基础理论……347
22.1.3 热分析流程……349
22.2 热分析示例……349
22.2.1 前处理……350
22.2.2 稳态热分析……354
22.2.3 瞬态热分析……356
22.3 本章小结……360
第 23 章 流场分析……361
23.1 流场分析基础……361
23.1.1 CFX 流场分析流程……361
23.1.2 物理条件定义……361
23.1.3 CFX 求解……362
23.1.4 CFX 后处理……363
23.2 流场分析示例……363
23.2.1 前处理……363
23.2.2 求解……369
23.2.3 后处理……369
23.3 流场致温度场分析示例……370
23.3.1 前处理……370
23.3.2 求解……372
23.3.3 后处理……373
23.4 本章小结……374
第 24 章 静磁场分析……375
24.1 静磁场分析基础……375
24.1.1 静磁场分析应用……375
24.1.2 静磁场分析过程……375
24.2 静磁场分析示例……376
24.2.1 前处理……376
24.2.2 求解……382
24.2.3 后处理……382
24.3 本章小结……383
第 25 章 多物理场耦合分析……384
25.1 多物理场耦合分析概述……384
25.2 电磁热耦合分析示例……385
25.2.1 问题描述……385
25.2.2 软件启动与保存……385
25.2.3 建立电磁分析……386
25.2.4 建立几何模型……387
25.2.5 设置求解域……391
25.2.6 赋予材料属性……391
25.2.7 添加激励……392
25.2.8 添加分析步……393
25.2.9 模型检查与计算……393
25.2.10 后处理……394
25.2.11 创建数据共享……395
25.2.12 设定材料……397
25.2.13 划分网格……398
25.2.14 添加边界条件与映射激励……399
25.2.15 求解计算……401
25.2.16 后处理……401
25.3 本章小结……402
第 26 章 优化设计分析……403
26.1 优化设计基础……403
26.1.1 优化设计概览……403
26.1.2 实验设计……405
26.1.3 相关参数……406
26.1.4 响应面……409
26.1.5 目标驱动优化……410
26.1.6 六西格玛分析……413
26.2 优化设计应用示例……414
26.2.1 基础分析……414
26.2.2 响应面……418
26.2.3 直接优化……421
26.2.4 SSA 分析……423
26.3 本章小结……425
参考文献……426

第 1 章 ANSYS Workbench 介绍



ANSYS Workbench 是 ANSYS 公司提供的协同仿真环境，通过对产品研发流程中仿真环境的开发与实施，搭建一个集成多学科异构 CAE 技术的仿真系统。本章主要介绍 ANSYS Workbench 17.0 的软件界面、基础使用知识和分析流程。

学习目标：

- 熟悉 ANSYS Workbench 界面。
- 理解项目工程图。
- 理解 ANSYS Workbench 分析项目管理。

1.1 软件概述

Workbench 的主要功能是解决传统 CAE 软件在设计研发中的不足，提高 ANSYS 与相关行业的结合性，方便共享数据，并在整个设计流程中极好地应用 ANSYS 软件。

ANSYS Workbench 主要由 3 个模块组成，分别为：

- Design Modeler——用来建立 CAD 几何模型，为分析做准备。
- Design Simulation——用 ANSYS 的分析模块实现网格划分、求解以及后处理，包括常见的 Mechanical、Fluent 等。
- Design Exploration——用于研究变量的输入（几何、载荷等）对响应（应力、频率等）的影响，可实现优化。

除了以上 3 个主要模块，ANSYS Workbench 还集成了很多其他模块，较典型的有：用于专业涡轮叶片设计的 Blade Modeler，进行全隐性耦合算法的 CFX，用于爆炸等场合的高度非线性显式动力学分析的 AUTODYN。这些模块将 ANSYS Workbench 打造成了应用极广的有限元分析软件。

1.2 软件界面

在安装好 ANSYS Workbench 17.0 的计算机上，只需要单击启动程序图标或快捷方式就可以打开 ANSYS Workbench 17.0 启动界面；单击“OK”按钮，关闭“Getting Started”对话框后，可以看到完整的软件界面，如图 1–1 所示。该界面上包括如下几个部分。

- 标题栏——位于界面顶部，显示待分析项目的名称（图 1–1 中显示的名称为“Unsaved Project Workbench”）。

➢ 菜单栏——位于标题栏下方，提供常见的菜单操作。需要注意的是 Units 菜单（图 1-2），其提供了不同的单位制供用户选择，默认情况下采用 m-kg 公制单位制。

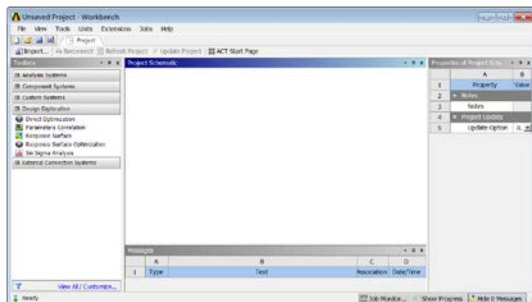


图 1-1　ANSYS Workbench 17.0 界面

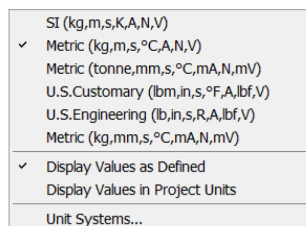


图 1-2　Units 菜单

➢ 工具栏——位于菜单栏下方，第一行图标提供常见的菜单操作快捷方式，同时还包括一个“Project”标签；第二行图标提供常见的分析项目操作快捷方式。
➢ 工具箱 Toolbox——位于窗口主体的左侧，提供分析所需系统的接入方式。
➢ 项目视图 Project Schematic——位于窗口主体的右侧，提供分析项目的图示（或称为项目工程图，如图 1-3 所示）。

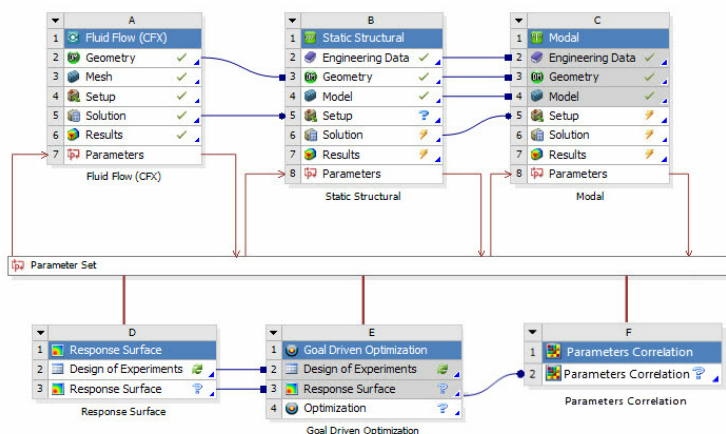


图 1-3　项目工程图示例

➢ 信息工具栏——位于窗口的下部，用于显示分析项目的状态和显示相关信息的接入方式。

以上几个部分是打开 Workbench 即出现的，还有更多的部分将在本书其他部分讲述。当然，也可以使用菜单栏的 View 菜单对界面进行定制，这里不再赘述。

1.3　Workbench 项目工程图

Workbench 的“Project”标签是用户进行分析工作的区域。在该区域中，分析项目通过项目工程图进行工作。项目工程图可以通过添加一个或多个功能组件的系统来构成，反映的

是分析过程的时间顺序。

1.3.1 项目工程图组成

项目工程图由位于主界面左侧的 Toolbox 中提供的功能组件构成。这些组件包括分析系统（Analysis System，见表 1-1）、组件系统（Components System，见表 1-2）、定制系统（Custom System，见表 1-3）和设计优化系统（Design Exploration，见表 1-4）。

表 1-1 分析系统

分 析 类 型	说 明
Design Assessment	ANSYS 设计评估
Electric	ANSYS 电场分析
Explicit Dynamics	ANSYS 显式动力学分析
Fluid Flow-Blow Molding(Polyflow)	Polyflow 流体吹塑分析
Fluid Flow-Extrusion(Polyflow)	Polyflow 流体挤压分析
Fluid Flow(CFX)	CFX 流体分析
Fluid Flow(Fluent)	Fluent 流体分析
Fluid Flow(Polyflow)	Polyflow 流体分析
Harmonic Response(ANSYS)	ANSYS 谐响应分析
Hydrodynamic Diffraction	ANSYS 水动力衍射分析
Hydrodynamic Time Response	ANSYS 水动力时间分析
IC Engine	ANSYS 内燃机分析
Linear Buckling	ANSYS 线性屈曲分析
Linear Buckling(Scmcef)	Scmcef 线性屈曲分析
Magnetostatic	ANSYS 静磁场分析
Modal	ANSYS 模态分析
Modal(Scmcef)	Scmcef 模态分析
Random Vibration	ANSYS 随机振动分析
Response Spectrum	ANSYS 响应谱分析
Rigid Dynamics	ANSYS 刚体动力学分析
Static Structural	ANSYS 结构静力分析
Static Structural(Scmcef)	Scmcef 结构静力分析
Steady-State Thermal	ANSYS 稳态热分析
Steady-State Thermal(Scmcef)	Scmcef 稳态热分析
Thermal-Electric	ANSYS 热电耦合分析
Throughflow	ANSYS 过流分析
Transient Structural	ANSYS 结构瞬态分析
Transient Structural(Scmcef)	Scmcef 结构瞬态分析
Transient Thermal	ANSYS 瞬态热分析
Transient Thermal(Scmcef)	Scmcef 瞬态热分析

Design Assessment
Designer Circuit
Designer Circuit Netlist
Eigenvalue Buckling
Eigenvalue Buckling (Samcef)
Electric
Explicit Dynamics
Fluid Flow - Blow Molding (Poly
Fluid Flow - Extrusion (Polyflow
Fluid Flow (CFX)
Fluid Flow (Fluent)
Fluid Flow (Polyflow)
Harmonic Response
HFSS
HFSS 3D Layout Design
HFSS-IE
Hydrodynamic Diffraction
Hydrodynamic Response
IC Engine (Fluent)
IC Engine (Forte)
Magnetostatic
Maxwell 2D
Maxwell 3D
Modal
Modal (ABAQUS)
Modal (Samcef)
Q3D 2D Extractor
Q3D Extractor
Random Vibration
Response Spectrum
Rigid Dynamics
RMxprt
Simplorer
Static Structural
Static Structural (ABAQUS)
Static Structural (Samcef)
Steady-State Thermal
Steady-State Thermal (ABAQUS
Steady-State Thermal (Samcef)
Thermal-Electric

Throughflow
Transient Structural
Transient Structural (Samcef)
Transient Thermal
Transient Thermal (Samcef)

表 1-2　组件系统

组 件 类 型	说　　明
Autodyn	Autodyn 非线性显式动力分析
BladeGen	涡轮机械叶片设计工具
CFX	CFX 高端流体分析工具
Engineering Data	工程数据工具
Explicit Dynamic(LS-DYNAExport)	LS-DYNA 显式动力分析
External Data	接入外部数据
External Model	接入外部模型
Finite Element Modeler	FEM 有限元模型工具
Fluent	Fluent 流体分析
Fluent(with TGrid meshing)	Fluent 流体分析（TGrid 网格）
Geometry	几何建模工具
ICEM CFD	ICEM CFD 网格划分工具
Icepak	电子热分析工具
Mechanical APDL	机械 APDL 命令
Mechanical Model	机械分析模型
Mesh	网格划分工具
Microsoft Office Excel	Excel 表格工具
Polyflow	Polyflow 流体分析
Polyflow–Blow Molding	Polyflow 吹塑分析
Polyflow-Extrusion	Polyflow 挤压分析
Results	结果后处理工具
System Coupling	系统耦合分析
TurboGrid	涡轮叶栅通道网格生成工具
Vista AFD	轴流风机初始设计
Vista CCD	离心压缩机初始设计
Vista CCD(with CCM)	径流透平设计（CCM）
Vista CPD	泵初始设计
Vista RTD	径流透平初始设计
Vista TF	叶片二维性能评估工具

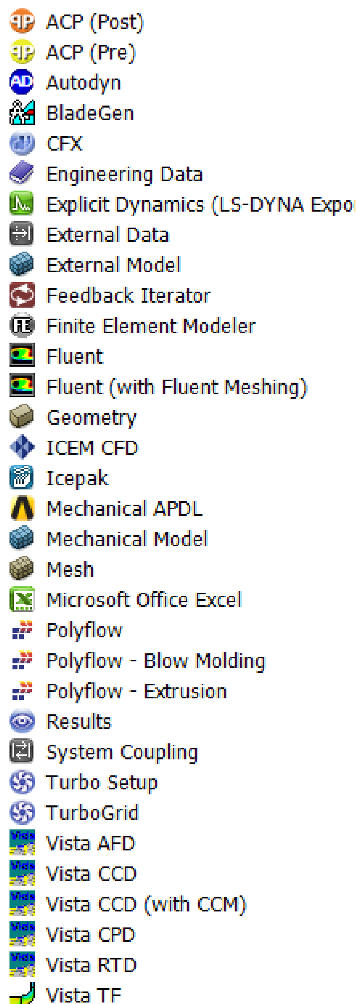


表 1-3　定制系统

名　　称	说　　明
FSI:Fluid Flow(CFX)->Static Structural	基于 CFX 的流固耦合分析
FSI:Fluid Flow(FLUENT)->Static Structural	基于 FLUENT 的流固耦合分析
Pre-Stress Modal	预应力模态分析
Random Vibration	随机振动分析
Response Spectrum	响应谱分析
Thermal-Stress	热应力分析

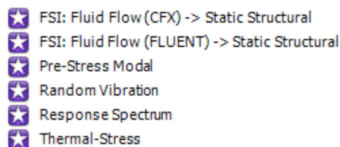


表 1-4　设计优化系统

名　　称	说　　明	
Direct Optimization	直接优化工具	Direct Optimization
Parameters Correlation	参数关联工具	Parameters Correlation
Response Surface	响应面工具	Response Surface
Response Surface Optimization	响应面优化工具	Response Surface Optimization
Six Sigma Analysis	六西格玛分析工具	Six Sigma Analysis

1.3.2 项目工程图基本操作

本节介绍项目工程图的基本操作，包括添加系统、命名系统、创建并连接系统、复制/移动/删除/替换系统。

1．添加系统

建立分析项目工程图的第一步就是添加系统。ANSYS Workbench 提供下面所述的 3 种方法向项目工程图中添加新的系统。

1）在 Toolbox 中双击系统图标。

2）从 Toolbox 中拖曳图标到项目工程图所在区域，并松开鼠标键。

3）鼠标右击项目工程图，并从弹出的快捷菜单中选择合适的系统。

2．命名系统

通常而言，在分析开始前，对所添加的系统进行命名是一个很好的习惯，这样可以帮助用户方便地记住项目工程图的细节。在操作中，可以在系统建立时直接命名或对已有的系统进行重命名。

1）直接命名：在添加系统后，系统下的文字框通常为高亮的，这时可以通过编辑文字进行命名。

2）重新命名：在已有的系统上，可以通过使用鼠标双击文字框高亮显示的系统名称，然后进行命名。

3．创建并连接系统

在添加一个系统后，可以向项目工程图中添加更多的系统。新的系统可以为独立系统，也可以连接到其他的系统上。

（1）独立系统　独立系统在分析中，可以提供对比或提供不同的分析对象结果集成的便利。可以通过下面所述的两种方法创建独立系统。

1）双击 Toolbox 的相应图标。

2）拖曳 Toolbox 中相应图标。

（2）连接系统　连接系统可以使不同系统间数据实现共享，这样可以快捷地实现多物理场耦合分析与多步骤分析等。可以使用如下方法连接系统。

1）连接已有系统：使用拖曳的方法可以连接两个已有系统。具体的操作为：从一个系统中拖曳共享项到另一个系统中的相应位置。

2）创建新的待连接系统：可以采用两种方式实现，分别为从 Toolbox 中拖曳相应的图标到已有系统待分享数据项的位置上，或在已有系统待分享数据项上右击鼠标，从弹出的快捷菜

单中选择相应的系统。

4．复制系统

可以采用鼠标右击并从弹出的快捷菜单中选择“Duplicate”的方式来实现已有系统的复制，但根据右击位置的不同，产生的结果可能不同。

1）在系统的第一行单击，可以复制一个独立的系统，但新系统与原系统没有数据共享。

2）在“Geometry”项上进行复制，得到的新系统将与原系统分享 Engineering Data 数据，而其他数据可编辑。

3）在“Model”项上进行复制，得到的新系统将与原系统分享 Engineering Data 和 Geometry 数据，而其他数据均可编辑。

4）在“Setup”项上进行复制，得到的新系统将与原系统分享 Engineering Data、Geometry 和 Model 数据，而其他数据均可编辑。

如需复制多个连接系统，则需要使用导出功能先得到数据文件，而后再导入。例如，对于力学分析应用，先导出*.mechdat 文件，然后再导入这个文件。

5．移动

在项目工程图中，可以将系统从一个位置移动到另外一个位置。所需要的操作为：按住系统的头部并将系统拖曳至新的位置。这个位置可以从预览图中看到。

6．删除

在项目工程图中，可以通过右击项目头部并从弹出的快捷菜单中选择“Delete”或直接按〈Delete〉键的方式来删除系统。

7．替换

可以通过右击项目头部并从快捷菜单中选择“Replace With”并选择相应系统的方式，对原有的系统进行替换。

1.3.3 常见项目工程图

本节介绍两种常见的基本项目工程图。

1．基本力学分析项目图

图 1-4 所示为一个典型的力学分析系统，其构成了基本力学分析项目图。在向工程项目图中添加了该系统后，“Engineering Data”项一般已设定好，但用户也可以通过 Engineering Data 设置或定义材料参数。

图中的“Geometry”项提供了几何模型的输入，可以直接打开 Design Modeler 编辑模型，或者右击“Geometry”项，并从弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”，再选择已有模型或直接启动 Design Modeler。

图中的“Setup”项提供了载荷和边界条件的输入方式。右击“Setup”项，并从弹出的快捷菜单中选择“Edit”，可以打开 Mechanical 软件。通过该软件可以选择应用工具和特征，具体操作将在后面的章节中描述。

2．基本流体分析项目图

图 1-6 所示为包含了两种流体分析方法（CFX 和 Fluent）的系统工程图。两种方法所用的系统基本相同，区别在于采用的算法不同。两者在构成上与力学分析系统基本一致。

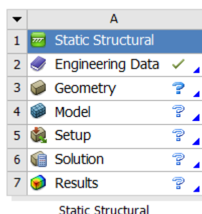


图 1-4　基本力学分析项目图

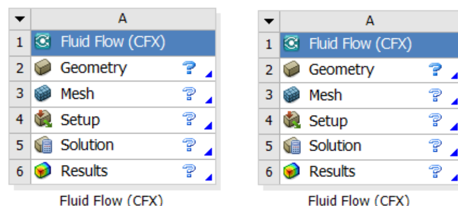


图 1-5　基本流体分析项目图

1.4　ANSYS Workbench 分析项目管理

1.4.1　项目文件夹

项目文件夹结构包括以下子文件夹。

- dp0 子文件夹。
- user_files 子文件夹。
- dpall 子文件夹。

各子文件夹的内容介绍如下。

1．dp0 子文件夹

ANSYS Workbench 为激活的项目指派了设计点，并创建了一个 dp0 子文件夹。这个 dp0 子文件夹总与相应的项目文件关联。

dp0 子文件夹中包含了系统文件夹。在系统文件夹中，根据系统的不同该文件夹包含的应用文件夹也不同，见表 1-5。

表 1-5　应用文件夹

系 统 类 型	文件夹名称	系 统 类 型	文件夹名称
Autodyn	ATD	Geometry	Geom
BladeGen	BG	Mesh	SYS/MECH
Design Exploration	DX	Mechanical	SYS/MECH
Engineering Data	ENGD	Mechanical APDL	APDL
FE Modeler	FEM	Turbo Grid	TS
Fluid Flow(Polyflow)	FFF,FLU	Vista TF	VTF
Fluid Flow(CFX)	CFX	Icepak	IPK

2．user_files 子文件夹

“user_files”子文件夹中包含了所有向项目输入的文件（如输入文件、引用文件等）与所有 ANSYS Workbench 生成的文件。

3．dpall 子文件夹

ANSYS Workbench 允许用户创建多个设计点，并提供将不同设计点的输入与输出对比的方法。为了分析不同设计点下的情况，首先需要获取当前项目参数。

一旦创建了参数，在项目工程图中便会出现一个名为“Parameters”的项和一个名为“Parameter Set”的项目条。在这种情况下，当前项目将被指派给设计点 0 或 dp0。

可以使用“Parameter”标签来改变输入参数，并创建多个设计点，而这些设计点可以分别更新或顺序更新。在更新设计点之前，需要确定是否保留这些设计点产生的文件。ANSYS Workbench 仅保存当前设计点的数据和其他设计点的输出参数。

如果想获得其他设计点的数据作为当前设计点数据，可以使用设计点上的快捷菜单中的“Copyinputsto Current”选项。如果想保存其他设计点的数据文件，则必须提前对这些设计点进行标记。

在更新非当前设计点时，ANSYS Workbench 将创建临时设计点文件夹。如果选择其中一个设计点进行输出，该设计点文件夹将被另存为一个新的项目文件夹，名为<filename>_dpn_files。其中的“n”为设计点的标号，但必须在更新前对其进行标记才能输出。

例如，一个分析项目包括一个流体分析系统 FFF、一个力学分析系统 MECH 和 Design Xplorer 设计参数。项目工程示例如图 1-6 所示。

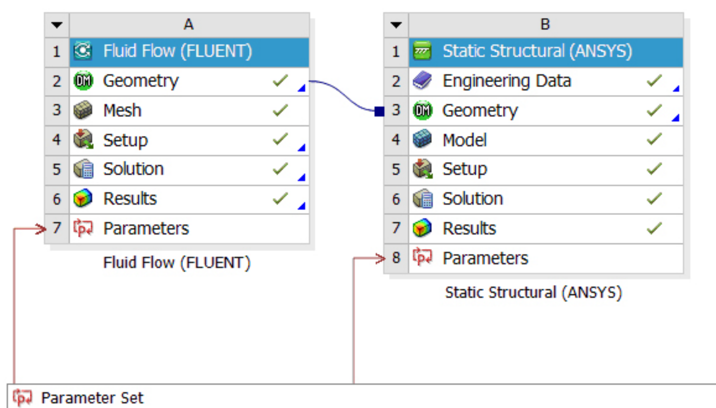


图 1-6 项目工程图例

该项目包含的文件夹及层次如下。

```
Myworkbenchproject_files
 dp0
  FFF
    DM
    Fluent
    MECH
    Post
  global
    MECH
      FFF
      SYS
  SYS
    ENGD
    MECH
```

dpall
global
DX



1.4.2 文件与项目

本节介绍文件与项目操作的相关内容，主要包括文件导入、文件存档、项目恢复、项目锁定。

1．文件导入

在使用 ANSYS Workbench 时经常需要对所要使用的文件进行导入，这些文件包括输入文件、几何图形文件、已有网格文件等。

在编辑上面所提到的文件时，ANSYS Workbench 只对在项目文件中保存的导入文件的副本进行编辑，而不会去对源文件进行直接的操作。这样可以使原始文件得到有效的保护。

ANSYS Workbench 17.0 版本之前 Workbench 产生的文件可以通过使用“File”→“Import”的方式进行导入。导入后，ANSYS Workbench 17.0 将生成能够代表以前版本项目工程图的系统、分析项和链接。

2．文件存档

为了便于协同工作，通常需要将项目在不同的设计人员间传递。这就需要将所有的文件打包进行传递，这时可以选择“File”→“Archive”。在打开的“Save Archive”对话框中，选择保存的路径，并选择需要保存的文件类型（可选*.wbpz 或*.zip*.tar.*gz）。

3．项目恢复

ANSYS Workbench 会为当前激活的项目和正在进行的项目创建备份文件。在发生意外时可以使用这些文件对项目进行恢复，可恢复到最近一次保存的事件位置。这一点很重要，因为任何在计算机中进行的工作均存在意外的可能，而为了尽可能减少意外对项目的影响，必须对项目进行备份。记住，不要移动或改变备份文件夹。

如果项目保存的功能失效，还可以使用下面的方法尽可能地防止意外发生或挽回损失。

1）恢复到最近保存的项目。

2）将最近保存的项目备份后再对正在进行的项目进行操作。

3）退出 Workbench，而后再做决定。选择手动处理保存失效问题。这样，备份文件夹将不会被清空，再用手动的方法可以恢复项目。

4．项目锁定

ANSYS Workbench 使用了项目锁定机制，以防止项目在同一时间被不同的会话调用而造成数据库的不一致。一般通过在项目文件夹中创建一个*.lock 文件对项目进行锁定；而将该文件删除，则可以解除锁定。

1.4.3 项目文件管理注意事项

使用 ANSYS Workbench 时，应利用图形界面对项目进行管理。一般情况下，不要轻易修改项目文件夹中的任何项目，除非非常熟悉。因为 ANSYS Workbench 并不能识别并意识到项目文件夹中的任何直接改动。

如不小心直接在项目文件夹中删除了项目文件，在打开该项目时可能出现警告信息。这

时需要根据丢失的文件的类型采取相应的措施：

1）对于程序自动写入的文件，例如，数据库文件、几何模型文件、设计数据文件、应用产生文件等，可以使用“View”→“Files”打开文件操作面板，在这里可以使用快捷菜单修复文件或永久地删除文件。必须非常小心地修复这些文件，否则产生的文件可能与原来的文件不相同，这将使整个分析项目面临巨大的风险。

2）对于非程序自动写入的文件，如用户输入文件、dpn 等，可以进行替代并再次打开系统。这些文件对于分析项目来说可能不是必需的，这时可以忽略警告信息。

在下列情况下，项目系统可能会删除、备份或重建文件：

1）在项目工程图中删除、复制或替代系统。

2）在分析项中打开应用。

3）在关闭项目时没有进行保存。

4）对项目进行存档。

5）在更新所有设计点操作时，程序转至下一个设计点运行。

在程序进行上述操作时，用户将不被允许在其他应用中打开这些项目文件，以保证这些文件的管理操作有效。

1.4.4 ANSYS Workbench 文件

ANSYS Workbench 文件主要包括数据库文件、日志文件和设计点日志文件。根据应用的不同，ANSYS Workbench 将产生的数据文件如下。

ANSYS Workbench→*.wbpj

Mechanical APDL →*.db

Fluent →*.cas, *.dat, *.msh

CFX →*.cfx, *.def, *.res, *.mdefand, *.mres

Design Modeler →*.agdb

CFX-Mesh →*.cmdb

Mechanical →*.mechdb

Meshing →*.cmdb

Engineering Data →*.eddb

FE Modeler →*.fedb

Mesh Morpher →*.rsx

ANSYS Autodyn →*.ad

Design Xplorer →*.dxdb

Blade Gen →*.bgd

日志文件是 ANSYS Workbench 在会话期间产生的记录文件。设计点日志文件是在设计点更新后更新的参数值被写入的一个位于 user_files 文件夹的 CSV 日志文件。

1.4.5 导入历史数据库

ANSYS Workbench 提供了导入较低版本数据库的 3 种不同的方法。

1．快捷菜单导入

文件可以通过分析项的快捷菜单导入。使用这种方法导入，首先需要创建合适的系统或分析项，然后通过该方法导入。

2.“File”→“Import”方式导入

通过选择“File”→“Import”方式导入，可以自动创建合适的系统和分析项。然而，用户需要启动相关应用或编辑器来使用导入文件。也可以通过拖曳的方式，从文件夹中直接将需要导入的文件夹拖曳到项目工程图中，这与“File”→“Import”方式导入本质上是一致的。

3．项目导入

项目文件可以作为过去项目部分进行导入。当项目文件通过“File”→“Import”菜单选取时，所有相关系统、分析项和连接将被自动创建。

但需要注意的是，不是所有的产品/数据库都可以使用以上 3 种方法，具体导入方法见表 1−6。表中所列的并非全部，更多的可参考 ANSYS 17.0 HELP 文件。

表 1−6　导入方法

应　　用	方　法　一	方　法　二	方　法　三
ANSYS Workbench,Release11or10(*.wbdb)			×
Mechanical(*.dsdb)		×	×
FE Modeler(*.fedb)		×	×
Engineering Data(*.eddb)			×（对流和载荷历史除外）
Engineering Data(*.xml, *.engd)		×	
AWA(*.aqdb)		×	×
Autodyn(*.ad)		×	×
Mechanical APDL(*.inp, *.dat, *.cdb, *.mac, *.anf)	×		
Design Modeler(*.agdb)	×	×	×
Meshing①(*.cmdb)		×	×
Fluent(*.msh, *.cas, *.dat)	×		
CFX(*.cfx, *.def, *.res)	×	×	
Blade Gen(*.bdg)	×	×	

① 不支持由 ANSYS Workbench 10 创建的并包含 CFX 网格划分的.cmdb 文件。如需导入这样的文件，首先需将其导入 ANSYS Workbench 11，并保存为 ANSYS Workbench 11 文件后才能导入 ANSYS Workbench 17。

1.4.6 日志

日志是一个记录文件，其记录了用户打开会话直到关闭会话的所有操作。如进行设置，可以将日志自动保存到指定的路径中。日志也可以仅记录会话的一部分。日志工具可以通过打开“File”→“Scripting”菜单找到。

日志的重要用途与特点在于：

1）在会话过程中，如软件崩溃，可使用日志重建正在进行的工作。

2）日志与平台无关，可以被 ANSYS 12.1 以上的所有版本使用。

（1）设置日志参数　设置日志参数的方式如下。

1）在 ANSYS Workbench 中选择“Tools”→“Options”→“Journalsand Logs”。

2）选择“Record Journal Files”让 ANSYS Workbench 自动写入日志文件。

3）设置日志写入的默认路径。

4）设置日志保存的时间长度。

5）设置在运行日志文件时，需要在命令中插入多长的时间间隔。

6）单击“OK”按钮进行保存。

（2）记录日志　设置好日志参数后，就可以记录日志了。记录日志可以采用以下方式。

1）启动 ANSYS Workbench。

2）选择“File”→“Scripting”→“Record Journal”。

3）设置日志文件名和存放位置，单击“Save”按钮。

4）正常地在 GUI（Workbench 图形界面）中进行分析操作。

5）选择“File”→“Scripting”→“Stop Recording Journal”停止日志录制。

6）单击“OK”按钮关闭窗口。

注意：并非所有的操作均会被记录，被记录的是影响项目数据库的操作。一些不能被记录的操作如下。

1）GUI 层面的操作，如中断求解过程、打开帮助等。

2）一些整合数据的操作。

（3）重放日志文件　日志文件支持重放，这样可以通过日志文件记录的内容快速重复过去的操作。重放操作的步骤如下。

1）选择“File”→“Scripting”→“Run Script File”。

2）找到需要重放的日志文件，并单击“Open”按钮。

3）这时会自动进行记录操作。

1.4.7 项目报告

ANSYS Workbench 项目报告可以对分析项目进行可视化的“快照”。报告的内容和组织根据项目工程图的布置不同而不同，包括项目信息、分析系统信息、分析项目信息和可能由项目中的应用提供的内容。

注意：到目前为止，仅有 Design Xplorer 和 CFD-Post 为报告提供详细的内容，而其余的应用所提供的内容仅限于在项目层面可以看见的内容。

本小节将介绍项目报告的有关操作和内容，包括：

1）配置项目报告。

2）生成项目报告。

3）设计点的项目报告内容。

4）编辑项目报告。

1．配置项目报告

可以通过 Workbench 的“Option”对话框设置项目报告，操作方法如下。

1）在 Workbench 图形界面选择“Tools”→“Options”。

2）在弹出的“Options”对话框中，打开导航树下的“Project Reporting”项目。

3）选中“After exporting report, automatically open indefault browser”复选框，这样可以

启动默认浏览器并在报告生成后自动打开。如果不选该项，就需要找到报告文件并手动打开。

对于 CFD-Post 数据，如需在报告中得到，可进行以下操作。

1）在项目工程图下，右击 ANSYS CFD 分析系统的“Result”分析项，并在弹出的快捷菜单中选择“Properties”。

2）在 Properties 视图里的“Project Reporting”下，选中“Publish Report”复选框。

3）重复前两步直到所有需要输出的 CFD 结果均已输出。

注意：项目报告仅支持二维显示。

2．生成项目报告

项目的内容和状态决定了报告的内容。因此，项目报告也很好地反映了报告生成时项目的当前状态。仅需选择“File”→“Export Report”便可生成报告。

3．设计点的项目报告内容

如果项目包含设计参数，且报告内容在项目设计点更新时由应用提供，这时，设计点列表中每个设计点将会包含一个链接到分报告的链接。每个设计点具体的报告内容可以通过列表中的超链接打开。

4．编辑项目报告

生成的报告如果不能满足需要，可以通过下面的操作步骤进行修改。

1）在一个能使用 HTML 语言的编辑器（如 Microsoft Word）中打开报告文件。

2）编辑报告的内容和格式。

3）将编辑后的报告文件存到一个新的位置，以免被 Workbench 再次写入。

1.5 使用帮助

学习或使用任何软件，都应该注意软件“帮助”的使用，对于 ANSYS Workbench 也不例外。本节将介绍 ANSYS Workbench 提供的 3 个不同层次的帮助：

1）快速帮助。

2）边栏帮助。

3）在线帮助。

1．快速帮助

对于项目工程图中的系统，其各个分析项在大多数情况下都可以直接调用快速帮助。单击分析项右下角的蓝色箭头可以打开一个简略的帮助面板，如图 1-7 所示。

快速帮助的内容通常与分析项的状态有关；在分析项状态改变的情况下，帮助面板里面的内容会自动更新以与分析状态匹配。从快速帮助中，同样也可以找到在线帮助系统中的相关主题。

2．边栏帮助

与内容相关的帮助在任何时候按下〈F1〉键时均可以调用。这时，边栏帮助视图（图 1-8）将会显示在屏幕的右侧。帮助的内容与鼠标最后单击的位置有关。

如果没有单击任何位置，帮助的内容将会显示通用 GUI 视图主题内容。如果在项目工程图中没有任何系统时单击，帮助的内容将会显示 Getting Started 主题内容。



如果单击了项目工程图中的一个或多个系统，帮助的内容将会显示与这些系统类型相关的主题内容。

除上面介绍的方法外，还可以通过选择“Help”→“Show Sidebar Help”来打开边栏帮助。

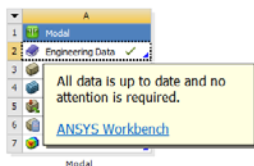


图 1-7　快速帮助

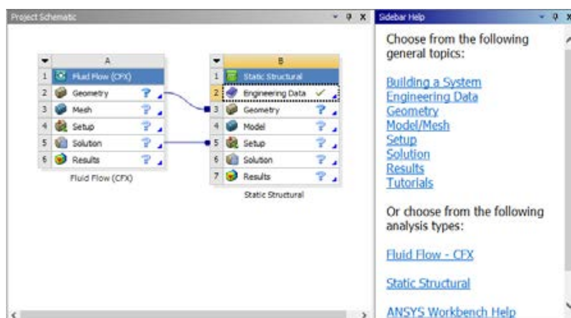


图 1-8　边栏帮助

3．在线帮助

在线帮助（图 1-9）可以通过 ANSYS Workbench 的 Help 菜单打开，或通过快速帮助与边栏帮助中提供的相关链接打开。在线帮助提供了 ANSYS Workbench 特征和功能的综合讨论，并提供了搜索功能。

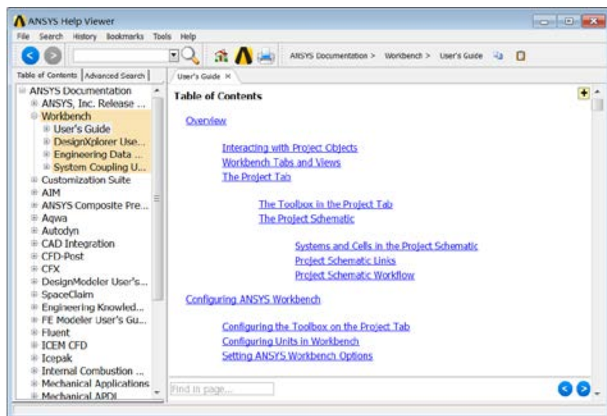


图 1-9　在线帮助

1.6　本章小结

本章介绍了使用 ANSYS Workbench 17.0 的基础知识，包括软件界面、项目工程图、分析项目管理和使用帮助等内容。通过这些内容的学习，可以对 ANSYS Workbench 软件的基本操作有一定的了解，这对以后的学习将非常有帮助。然而，本章中还有很多没有覆盖到的地方，请读者在学习和使用 Workbench 时注意参考有关资料或帮助文档内容。



第2章 工 程 数 据

工程数据是指在分析系统中采用了材料数据。ANSYS Workbench 使用了专门的模块 Engineering Data 来处理这些数据。本章将介绍 Engineering Data 的使用方法、材料数据的处理和各种分析所支持的材料属性等内容。

学习目标：

- 熟悉 Engineering Data 应用。
- 掌握 Engineering Data 应用设置材料参数。

2.1 工程数据应用

工程数据是分析中采用的材料数据的来源，可以用来保存用户输入的材料信息，并将其作为材料数据库进行保存。在工程数据应用中，用户可以创建、保存和获取材料模型，创建并保存材料数据库以用于后续的分析或分享给其他用户。

2.1.1 Engineering Data 应用概览

在 ANSYS Workbench 17.0 中，Engineering Data 应用被放置在组件系统中作为独立系统，除此之外在各种分析系统中，它还作为分析项出现。

在独立的系统中，用户可以获取所有的材料属性，而作为分析项出现在其他分析系统中时，一般只出现与相应系统环境相关的材料模型和属性。

通过下面的方法可以进入 Engineering Data 应用。

1）在项目工程图中插入一个 Engineering Data 组件系统或一个常见的分析系统。

2）在“Engineering Data”项上右击，并在弹出的快捷菜单中选择“Edit”。

进行上面的操作后，Engineering Data 应用的工作空间将出现。在这里，用户可以浏览分析系统中的材料数据，获取外部数据源，创建新数据或保存数据以供将来使用。

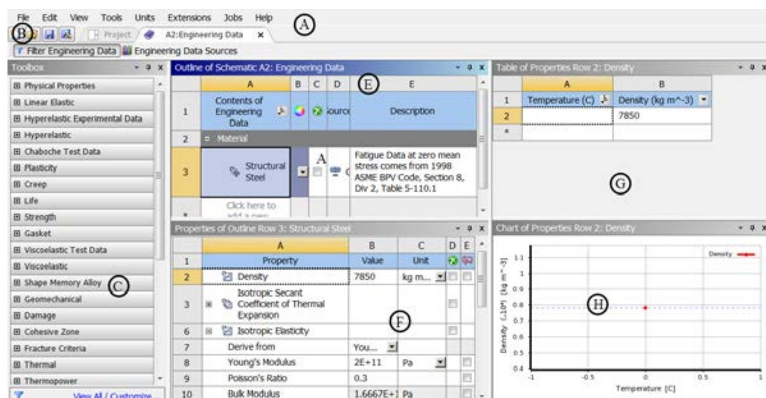
如果在不同的系统间共享 Engineering Data 中的材料数据，此时一定要注意：若在一个系统中改变了材料数据，将导致其他系统中所分享的材料数据发生改变。

2.1.2 界面

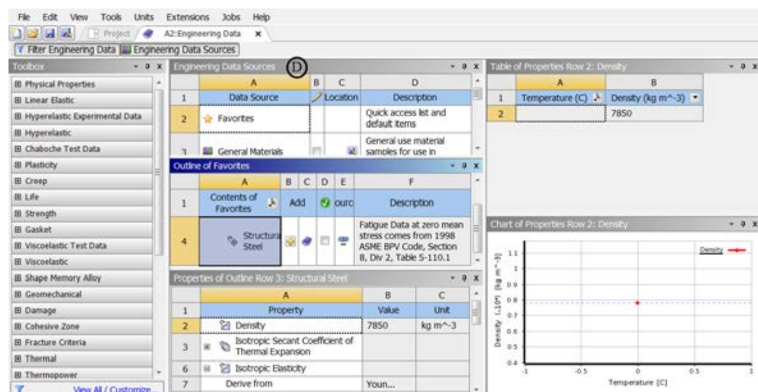
Engineering Data 应用的界面被集成到了 Workbench 中，并且根据用户选取的项目不同而有所不同。

如图 2-1 所示的两个界面布局构成了完整的 Engineering Data 界面。如图 2-1a 所示内容可以通过打开 Engineering Data 操作得到。图 2-1b 所示是在图 2-1a 中单击“Engineering Data

Sources”按钮得到的。图 2-1 所示的界面是默认情况，用户还可以通过 View 菜单进行修改。



a)



b)

图 2-1　Engineering Data 界面

a) Engineering Data 应用默认界面　b) 单击“Engineering Data Sources”按钮后的 Engineering Data 界面

如图 2-1 所示，对 Engineering Data 应用界面的不同部分进行了标号，各个标号的相关描述见表 2-1。

表 2-1　Engineering Data 应用界面

标　号	名　称	描　述
A	菜单栏	提供 Engineering Data 和分析项目菜单栏操作
B	工具栏	提供 Engineering Data 和分析项目工具栏操作
C	工具箱	显示可以用于工程数据的项目
D	“Engineering Data Sources”面板	显示可用的数据源和位置、编辑状态和描述
E	“Outline”面板	显示选取的数据源和工程数据的内容
F	“Properties”面板	显示“Outline”面板选取材料的属性
G	“Table”面板	显示“Outline”面板选取材料的数据表格
H	“Chart”面板	显示“Properties”面板中材料属性的数据表格

1．菜单栏

菜单栏中提供的菜单及其描述见表 2-2。

表 2-2　Engineering Data 应用界面菜单栏

菜　单	选　项	描　述
File	Import Engineering Data	导入数据到选定的数据源中
	Export Engineering Data	导出数据源或选定的项目到磁盘
Edit	Delete	删除选定的项目
View	多个选项	参考 ANSYS Workbench 界面介绍
Units	多个选项	参考 ANSYS Workbench 界面介绍
Extensions	多个选项	参考 ANSYS Workbench 界面介绍
Help	多个选项	参考 ANSYS Workbench 界面介绍

2．工具栏

工具栏中一般按钮的功能可以参照 ANSYS Workbench 界面介绍，但注意表 2-3 中的按钮，可以影响所能定义的工程数据。

表 2-3　工具栏

图　标	描　述
	根据所在的系统进行数据过滤的开关

3．工具箱

Engineering Data 一般根据用户选取的材料类型会自动过滤工具箱中的内容。

4.“Engineering Data Sources”面板

“Engineering Data Sources”面板提供了可在“Outline”面板中显示的数据，该面板中总是会显示：材料数据库，常用材料数据库。通过这个面板，可进行的操作包括：

1）创建新的材料数据库。

2）添加现有材料数据库。

3）删除材料数据库。

4）支持对材料数据库进行编辑；按钮提供编辑功能。

5）保存材料数据库。

5.“Outline”面板

“Outline”面板提供了材料名称的列表，该面板中可以进行以下操作。

1）创建新的材料。

2）删除材料。

3）对材料重命名。

4）抑制材料；列提供此操作。

5）添加对材料的描述。

6）从外部数据中向系统添加材料。

7）为分析模型选择默认材料。

面板中的内容为表格，表格中各列所包含的内容如下。

（1）Contents of Engineering Data　该列显示材料的名称，在材料的名称前有状态图标，其意义如下：

➢ ——该材料的数据设置符合规则。

➢ ——该材料的数据设置不符合规则。

（2）列　该列提供了抑制功能，选中列中的图框可实现对材料的抑制。

（3）Add　该行提供了材料的添加操作：

➢ ——该按钮直接提供添加操作。

➢ ——该图标的出现意味着材料被包含到了材料库中。

（4）列　该列提供了默认材料的选中功能。

（5）Source　该列提供了数据来源的位置显示。

（6）Description　该列提供了对材料的描述功能和显示。

6.“Properties”面板

“Properties”面板显示“Outline”面板中选中材料的信息，通过这个面板可以进行以下操作。

1）添加属性、数据表和曲线拟合。

2）删除属性。

3）修改属性数据。

4）抑制属性。

5）对属性进行参数化处理。

该面板中列表的部分列的功能如下。

（1）Property　该列列出了所选材料的所有属性。该列中的表格对应了“Table”面板和“Chart”面板中的显示内容。在内容前通常会有图标，其性质和描述见表 2-4。

表 2-4　Property 列中的图标

图　标	描　述
	该属性由单个属性数据构成
	该属性中的某些内容需要关注
	该属性由属性数据集合构成
	该属性需要关注数据集合构成的某些内容

（2）Unit　该列显示了所设置数据的单位，如单位不正确可直接在下拉菜单中重新选择。

（3）Parameter　该列提供了材料数据参数化的状态显示和操作。

7.“Table”面板

“Table”面板提供了选中属性的表格显示，如图 2-2 所示显示了热导率的数据。

8. “Chart”面板

“Chart”面板提供了选中属性的图形显示，图 2-3 所示为热导率的曲线。

Table of Properties Row 20: Isotropic Thermal Conductivi

	A	B
1	Temperature (C)	Thermal Conductivity (W m^-1 C^-1)
2	-100	114
3	0	144
4	100	165
5	200	175

图 2-2 “Table”面板

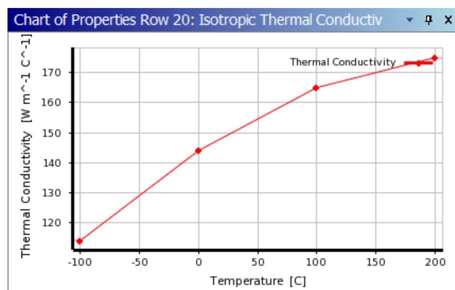


图 2-3 “Chart”面板

2.1.3 工程数据源

工程数据源包含了工程数据信息。在 Engineering Data 的数据源中有 3 种类型的数据源：

1）Engineering Data 数据源。

2）Library 数据源。

3）Favorite 数据源。

1．Engineering Data 数据源

通常情况下，Engineering Data 数据源会根据选择的系统不同而显示不同的信息。但如果在不同的分析系统中分享数据，Engineering Data 数据源也可以显示 Engineering Data 组件系统中显示的信息。Engineering Data 应用可以对其提供查看、编辑和添加数据等功能。

2．Library 数据源

Library 数据源是工程数据的集合。Engineering Data 应用可以对其提供查看、编辑和添加数据等功能。

3．Favorite 数据源

Favorite 数据源包含了用户常用的材料数据，可以通过其向 Engineering Data 数据源添加材料数据以便以后使用。

2.1.4 材料数据

对材料数据的主要操作包括修改数据、使数据参数化、抑制数据和过滤数据。

1．修改

材料数据中出现的常量数据和表格数据均可以进行修改。前者的修改可以直接在“Properties”面板进行，也可以在“Table”面板进行，而后者的修改一般只在“Table”面板中进行。

2．参数化

通过参数化的操作可以对材料数据进行参数化。对于常量数据而言，直接单击参数化的图框即可。对于表格数据而言，不能直接参数化，但可以对其比例系数和偏移量进行参数化。

3．抑制

如需要对数据进行抑制，直接选中抑制数据列的方框即可。

4．过滤

如需要对数据进行过滤，直接单击“过滤”按钮即可。

2.1.5 基本操作

可在 Engineering Data 中进行的基本操作见表 2-5。

表 2-5　可在 Engineering Data 中进行的基本操作

操　　作	步　　骤
进入 Engineering Data	在项目工程图中双击“Engineering Data”项或右击该项并在弹出的快捷菜单中选择“Edit”
进入“Engineering Data Sources”面板	进入 Engineering Data 后在工具栏上单击“Engineering Data Sources”按钮
将数据导入数据源中	① 进入 Engineering Data ② 在“Engineering Data Sources”面板中选择一个数据源 ③ 选中相应的方框 ④ 选择“File”→“Import Engineering Data...” ⑤ 选择一个文件并单击“Open”按钮
将数据作为数据源导入	① 进入 Engineering Data ② 在“Engineering Data Sources”面板中的最后一行单击“浏览”按钮 ③ 选择一个文件并单击“Open”按钮
导出数据源	① 进入“Engineering Data Sources”面板 ② 选择“Engineering Data Sources”面板中的一个数据源 ③ 选择“File”→“Export Engineering Data...” ④ 在“Save As”对话框中设置导出文件信息
导出单个数据	① 进入“Engineering Data Sources”面板 ② 选择“Engineering Data Sources”面板中的一个数据源 ③ 在“Outline”面板中选择一个或多个项目 ④ 选择“File”→“Export Engineering Data...” ⑤ 在“Save As”对话框中设置导出文件信息

2.2　材料数据

本节将介绍 Engineering Data 支持的常见材料属性及进行材料属性设置的操作。

2.2.1 支持的材料属性

根据分析类型的不同，各类分析支持的材料属性如下所述。

1．Electric（电学）

电学分析支持的材料类型见表 2-6。

表 2-6　电学分析支持材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Isotropic Resistivity	各向同性电阻率
Orthotropic Resistivity	正交各向异性电阻率

2．Explicit Dynamics（显式动力学）

显式动力学分析支持的材料类型见表 2−7。

表 2−7 显式动力学分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Elasticity	正交各向异性弹性系数
Viscoelastic	粘弹性
Bilinear Isotropic Hardening	双线性各向同性硬化
Multilinear Isotropic Hardening	多线性各向同性硬化
Bilinear Kinematic Hardening	双线性随动硬化
Multilinear Kinematic Hardening	多线性随动硬化
Bulk Modulus	体积弹性模量
Shear Modulus	剪切模量
Orthotropic Stress Limits	正交各向异性应力极限
Orthotropic Strain Limits	正交各向异性应变极限

3．Harmonic（谐响应）

谐响应分析支持的材料类型见表 2−8。

表 2−8 谐响应分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Damping Factor(α)	质量矩阵阻尼系数
Damping Factor(β)	刚度矩阵阻尼系数
Constant Damping Coefficient	常量阻尼系数
Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Elasticity	正交各向异性弹性系数
An Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Hyperelastic Material Models	超弹性材料模型

4．Linear Buckling（线性屈曲）

线性屈曲分析支持的材料类型见表 2−9。

表 2−9 线性屈曲分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Elasticity	正交各向异性弹性系数
AnIsotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Stress Limits	正交各向异性应力极限
Orthotropic Strain Limits	正交各向异性应变极限
Superelasticity	超弹性
Shape Memory Alloy	形状记忆合金

5．Magnetostatic（静电磁场）

静电磁场分析支持的材料类型见表 2-10。

表 2-10　静电磁场分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Relative Permeability	相对磁导率
Coercive Force & Residual Induction	矫顽力&剩余磁感
B-H Curve	B-H 曲线
Demagnetization B-H Curve	B-H 曲线
Relative Permeability	相对磁导率
Isotropic Resistivity	各向同性电阻率
Orthotropic Resistivity	正交各向异性电阻率

6．Modal（模态）

模态分析支持的材料类型见表 2-11。

表 2-11　模态分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Damping Factor(α)	质量矩阵阻尼系数
Damping Factor(β)	刚度矩阵阻尼系数
Constant Damping Coefficient	常量阻尼系数
Coefficient of Thermal Expansion	热膨胀系数
Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Elasticity	正交各向异性弹性系数
An Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Bilinear Isotropic Hardening	双线性各向同性硬化
Bilinear Kinematic Hardening	双线性随动硬化
Multilinear Isotropic Hardening	多线性各向同性硬化
Multilinear Kinematic Hardening	多线性随动硬化
Chaboche Kinematic Hardening	非线性随动硬化
Anand Viscoplasticity	Anand 粘塑性模型
Orthotropic Stress Limits	正交各向异性应力极限

7．Random Vibration & Response Spectrum（随机振动和响应谱）

随机振动和响应谱分析支持的材料类型见表 2-12。

表 2-12　随机振动和响应谱分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Damping Factor(α)	质量矩阵阻尼系数
Damping Factor(β)	刚度矩阵阻尼系数
Constant Damping Coefficient	常量阻尼系数
Coefficient of Thermal Expansion	热膨胀系数
Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Elasticity	正交各向异性弹性系数
Bilinear Isotropic Hardening	双线性各向同性硬化
Bilinear Kinematic Hardening	双线性随动硬化
Multilinear Isotropic Hardening	多线性各向同性硬化
Multilinear Kinematic Hardening	多线性随动硬化
Chaboche Kinematic Hardening	非线性随动硬化
Anand Viscoplasticity	Anand 粘塑性模型
Orthotropic Stress Limits	正交各向异性应力极限
Orthotropic Strain Limits	正交各向异性应变极限
Superelasticity	超弹性
Shape Memory Alloy	形状记忆合金

8．Static Structural & Modal（SAMCEF）[结构静力和模态（SAMCEF）]

结构静力和模态（SAMCEF）分析支持的材料类型见表 2-13。

表 2-13　结构静力和模态（SAMCEF）分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	各向同性切向热膨胀系数
Orthoropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	正交各向异性切向热膨胀系数
Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Elasticity	正交各向异性弹性系数
Bilinear Isotropic Hardening	双线性各向同性硬化
Bilinear Kinematic Hardening	双线性随动硬化
Multilinear Isotropic Hardening	多线性各向同性硬化
Multilinear Kinematic Hardening	多线性随动硬化
Chaboche Kinematic Hardening	非线性随动硬化
Nonlinear Elastic Model with Damage	带损伤的非线性弹性模型

9．Steady-State Thermal（稳态热）

稳态热分析支持的材料类型见表 2-14。

表 2-14 稳态热分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Isotropic Thermal Conductivity	各向同性热导率
Orthotropic Thermal Conductivity	正交各向异性热导率

10．Thermal-Electric（热-电）

热-电分析支持的材料类型见表 2-15。

表 2-15 热-电分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Isotropic Thermal Conductivity	各向同性热导率
Orthotropic Thermal Conductivity	正交各向异性热导率
Isotropic Resistivity	各向同性电阻率
Orthotropic Resistivity	正交各向异性电阻率

11．Static Structural & Transient Structural（静态结构与瞬态结构）

静态结构与瞬态结构分析支持的材料类型见表 2-16。

表 2-16 静态结构与瞬态结构分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Coefficient of Thermal Expansion	热膨胀系数
Stress-Strain Relationships	应力-应变关系
Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Orthotropic Elasticity	正交各向异性弹性系数
An Isotropic Elasticity	各向同性弹性系数
Damping Factor(α)	质量矩阵阻尼系数，仅适用于瞬态结构分析
Damping Factor(β)	刚度矩阵阻尼系数，仅适用于瞬态结构分析
Constant Damping Coefficient	常量阻尼系数，仅适用于瞬态结构分析
General Isotropic Hardening	通用各向同性硬化
Bilinear Isotropic Hardening	双线性各向同性硬化
Multilinear Isotropic Hardening	多线性各向同性硬化
General Kinematic Hardening	通用随动硬化
Bilinear Kinematic Hardening	双线性随动硬化
Multilinear Kinematic Hardening	多线性随动硬化
Chaboche Kinematic Hardening	非线性随动硬化
Rate-Dependent Plasticity	相关塑性率
Anand Viscoplasticity	Anand 粘塑性模型
Alternating Stress Mean Stress	交变平均应力
Alternating Stress R-Ratio	交变应力比率
Strain-Life Parameters	应变寿命参数

（续）

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Viscoelasticity	粘弹性
Tensile Yield Strength	抗拉屈服强度
Compressive Yield Strength	抗压屈服强度
Tensile Ultimate Strength	抗拉极限强度
Compressive Ultimate Strength	抗压极限强度
Gasket Model	垫片材料模型
Implicit Creep Equations	隐式蠕变方程
Strain Hardening	应变硬化
Time Hardening	时间硬化
Modified Time Hardening	修正时间硬化
Modified Strain Hardening	修正应变硬化
Combined Time Hardening	组合时间硬化
Generalized Time Hardening	通用时间硬化
Material Strength Limits	材料强度极限
Orthotropic Stress Limits	正交各向异性应力极限
Orthotropic Strain Limits	正交各向异性应变极限
Shape Memory Alloy	形状记忆合金(SMA)
Superelasticity	超弹性
Material Damage	材料损伤
Damage Initiation Criteria	损伤生成准则
Damage Evolution Law	损伤演变准则
Cohesive Zone	内聚层材料
Exponential for Interface Delamination	指数型内聚层材料模型
Bilinear for Interface Delamination	双线性型内聚层材料模型
Separation-Distancebased Debonding	基于分离距离的开裂材料模型
Fracture-Energiesbased Debonding	基于分裂能量的开裂材料模型
Fracture Criteria	断裂准则
Linear Fracture Criterion	线性断裂准则
Bilinear Fracture Criterion	双线性断裂准则

12. Rigid Dynamics（刚体运动学）

刚体运动学分析支持的材料类型见表 2-17。

表 2-17　刚体运动学分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度

13. Transient Thermal（瞬态热）

瞬态热分析支持的材料类型见表 2-18。

表 2-18 瞬态热分析支持的材料类型

ANSYS Workbench 属性名称	对应材料属性
Density	密度
Isotropic Thermal Conductivity	各向同性热导率
Orthotropic Thermal Conductivity	正交各向异性热导率
Enthalpy	焓

2.2.2 材料属性操作

进行材料属性操作时，首先必须进行的基本操作包括：

1）进入 Engineering Data 应用。

2）如需进行材料数据库操作，需要先将数据库设置为可编辑状态。

各种操作的步骤见表 2-19。

表 2-19 材料属性操作

操　　作	步　　骤
创建新材料	① 在“Outline”面板中单击“Click here to add a new material”行 ② 输入新材料的名称并按〈Enter〉键
添加材料属性	① 在“Outline”面板中选择要操作的材料 ② 在工具箱中单击要添加的材料属性
删除材料属性	① 在“Outline”面板中选择要操作的材料 ② 在“Properties”面板中选择需要删除的材料属性 ③ 右击并在弹出的快捷菜单中选择“Delete”或在菜单栏中选择“Edit”→“Delete”
修改材料属性	① 在“Outline”面板中选择要操作的材料 ② 对于常量数据，在“Properties”面板中改变相应数据的值或者单位 ③ 对于表格数据，在表格中改变相应数据的值或者单位
材料属性参数化	① 在“Outline”面板中选择要操作的材料 ② 找到需要参数化的属性，选中其后“parameter”列的复选框
抑制材料属性	① 在“Outline”面板中选择要操作的材料 ② 找到需要参数化的属性，选中其后“suppression”列的复选框
选择默认材料	① 在“Outline”面板中选择要设置为默认材料的材料 ② 右击并在快捷菜单中选择“Default Solid Material for Model”或“Default Fluid/Field Material for Model”

2.3 本章小结

本章介绍了 ANSYS Workbench 的工程数据设置模块 Engineering Data。该模块提供了材料输入的功能，另外软件本身携带的材料库也能满足一般工程分析的需要。在该模块中设置材料数据，需要初步理解所需设置的材料模型应设置的参数，然后按本章中介绍的方法进行设置。



第3章 几 何 建 模

ANSYS Workbench 17.0 提供了强大的 CAD 建模软件 Design Modeler。通过该软件可以建立具体的或抽象的待分析几何模型。本章将介绍的主要内容包括 DM 界面介绍、项目工程图中的 DM 操作和使用 DM 进行建模的基本操作。

学习目标：

- 熟悉 Design Modeler 应用。
- 掌握在 Design Modeler 中建模的方法。

3.1 Design Modeler 介绍

项目工程图中的几何模型可通过 Design Modeler（以下简称 DM）建立。DM 主要用于建立和编辑几何模型，其采用特征描述，支持参数化的实体建模，可以很方便地构造二维草图和三维实体模型，以及载入三维 CAD 模型。

即使对于没有使用过参数化实体建模的初学者，DM 也极为易学易用；而对于有经验的使用者而言，DM 也提供了将各种二维草图转换为三维实体模型的功能。

3.1.1 DM 概览

DM 是连接 CAD 软件与 CAE 软件的桥梁。CAD 模型通常不会考虑 CAE 分析的需要，而 DM 正好提供相应的功能满足 CAE 分析的需求。DM 采用全参数化实体建模，提供适用于有限元分析的模型。其建模功能包括：

1）模型创建。

2）CAD 模型修复。

3）CAD 模型简化。

4）概念化模型创建。

在 ANSYS Workbench 项目工程图中，DM 是唯一提供了可供分析使用的几何模型的程序。其在分析项目中的功能也可以总结为：

1）构造二维草图和三维实体模型。

2）载入三维 CAD 模型并修复。

本章主要介绍其前一种功能。利用 DM 建立几何模型需要以下 4 个基本条件。

1）二维草图：二维草图为三维几何模型的创建和概念建模作准备。

2）三维几何模型：将草图进行拉伸、旋转等操作得到几何模型。

3）CAD 模型输入：对直接导入的 CAD 模型进行修补，使之适应有限元网格划分。

4）概念建模：用于创建和修补直线和表面实体，使之能应用于创建梁和壳体。

3.1.2 DM 界面

可以使用下面的方法打开 DM 界面：在打开的 ANSYS Workbench 中，从 Toolbox 的组件系统 Component Systems 中将“Geometry”拖曳至项目工程图区域，然后在得到的 Geometry 系统中右击“Geometry”项，在弹出的快捷菜单中选择“New Geometry”，如图 3-1 所示。

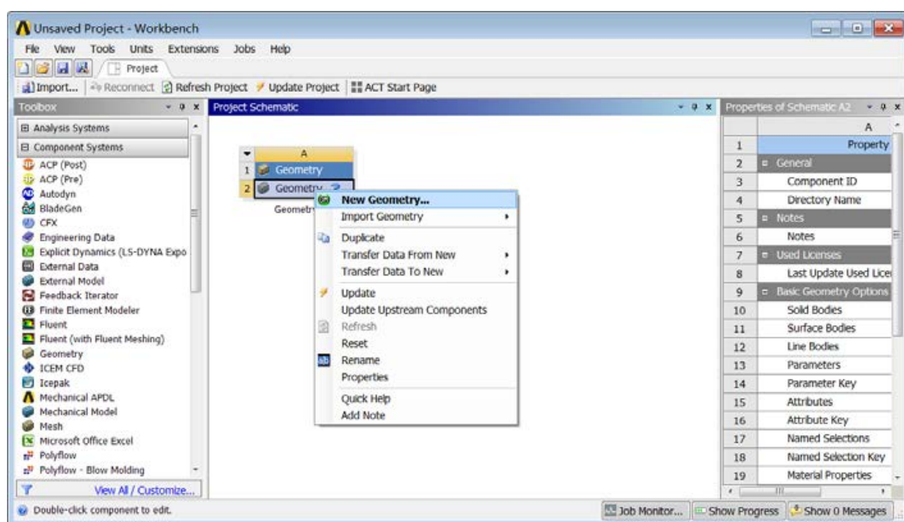


图 3-1　打开 DM 操作

经上述操作后，打开的 DM 界面如图 3-2 所示。根据用户的配置不同，打开的软件界面可能会略有差异。该界面基本类似于大多数建模软件。

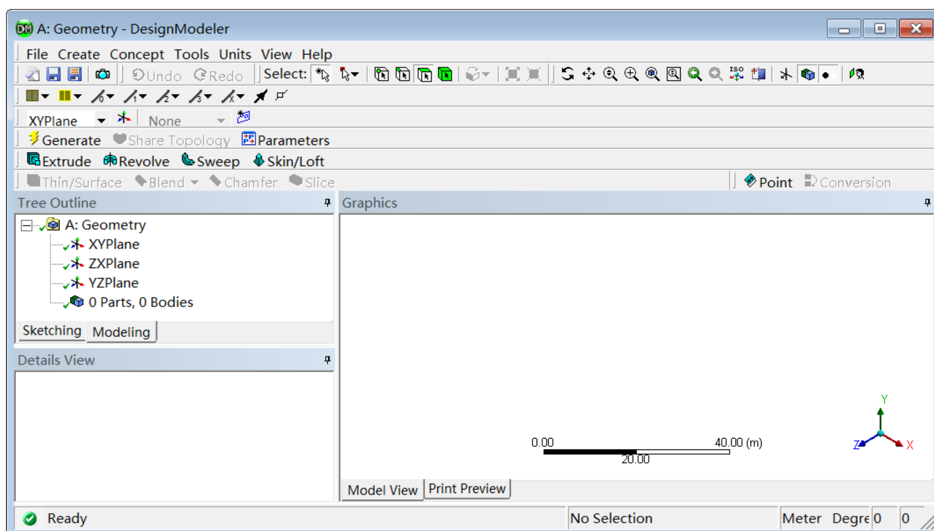


图 3-2　DM 界面

从图 3-2 中可以看到，DM 界面主要由 5 部分构成，具体如下。

- 工具栏：位于界面顶部，共 9 个工具条，其中一个为主菜单栏。
- 导航树（Tree Outline）和草图工具箱（Tool boxes）：位于界面左中位置，根据应用的模式不同，分别显示导航树（Tree Outline）和草图工具箱（Tool Boxes）中的一个。
- 图形窗口（Graphics）：位于界面的中间。
- 细节窗口（Detail View）：位于界面左下位置，根据应用的模式不同显示不同的信息。
- 状态条：位于界面下部，显示应用的状态信息。

下面逐一介绍 DM 界面的 5 部分。

1．工具栏

工具栏中包含的工具条共计 9 条，如下文所述。

（1）菜单工具条　菜单工具条如图 3-3 所示，包含的菜单有：文件操作（File），建模（Create），线及面的概念建模（Concept），建模工具（Tools），单位设置（Units），窗口视图管理（View），帮助（Help）。前 5 个菜单的内容和功能见表 3-1～表 3-5。

File　Create　Concept　Tools　Units　View　Help

图 3-3　菜单工具条

表 3-1　文件菜单

菜单选项	功　能
Refresh Input	更新上游输入的数据
Start Over	开始新建模型
Load Design Modeler Database	加载 DM 数据库文件
Save Project	保存项目
Export	输出模型到支持类型的文件
Attach to Active CAD Geometry	导入其他 CAD 打开的模型
Import External Geometry File	导入外部 CAD 文件
Import Shaft Geometry	导入轴建模文本文件
Write Script:Sketch(es) of Active Plane	将激活平面草图写入脚本
Run Script	运行脚本
Print	打印模型
Auto-save Now	自动保存
Restore Auto-save File	重建自动保存文件
Image Capture（在文件工具条中）	拍照
Recent Imports（左图未显示）	最近导入的快捷查询方式
Recent Scripts（左图未显示）	最近脚本的快捷查询方式
Close Design Modeler	关闭 DM



表 3-2　建模菜单

菜单选项	功　能
New Plane	新建平面
Extrude	拉伸
Revolve	旋转
Sweep	扫掠
Skin/Loft	蒙皮/放样
Thin/Surface	抽壳
Fixed Radius Blend	固定半径倒圆角
Variable Radius Blend	变换半径倒圆角
Vertex Blend	顶点倒圆角
Chamfer	倒角
Pattern	阵列
Body Operation	体操作
Body Transformation	体转换
Boolean	布尔操作
Slice	切分操作
Delete	删除
Point	特征点
Primitives	基本体

表 3-3　概念建模菜单

菜单选项	功　能
Lines From Points	从点创建线体
Lines From Sketches	从草图创建线体
Lines From Edges	从边缘创建线体
3D Curve	三维曲线线体
Split Edges	边缘切分
Surfaces From Edges	从线创建面体
Surfaces From Sketches	从草图创建面体
Surfaces From Faces	从面创建面体
Cross Section	设置线体横截面

表 3-4　建模工具菜单

菜单选项	功　能
Freeze	冻结
Unfreeze	解冻
Named Selection	选集
Attribute	属性
Mid-Surface	中间面

（续）

菜 单 选 项	功　能
Joint	连接
Enclosure	包覆
Face Split	面切分
Symmetry	对称
Fill	填充
Surface Extension	延伸面
Surface Patch	面批次
Surface Flip	面跳转
Solid Extension	实体延伸
Merge	融合
Connect	连接
Projection	投影
Conversion	几何体转换
Repair	修复
Analysis Tools	分析工具
Form New Part	构建新部件
Parameters	参数
Electronics	电子学菜单
Addins	插件
Options	选项

表 3-5　单位设置菜单

菜 单 选 项	功能/意义
Meter	米
Centimeter	厘米
Millimeter	毫米
Micrometer	微米
Foot	英尺
Inch	英寸
Large Model Support	大模型支持设置
Degree	度
Radian	弧度
Model Tolerance	模型误差

（2）文件工具条　图 3-4 所示为文件操作的基本工具条，其功能已在表 3-1 中描述。

（3）数据库工具条　图 3-5 所示为数据库操作的基本工具条。其中“Undo”为撤销；“Redo”为重做。



图 3-4　文件工具条



图 3-5　数据库工具条

（4）选择工具条　图 3-6 所示为选择工具条，其各个按钮的功能按顺序介绍见表 3-6。



图 3-6　选择工具条

表 3-6　选择工具条

图　标	名　称		功　能
	New Selection		新选取操作
或	Select Mode		选取模式（前一种为单击选择，后一种为框选）
	Selection Filter:Points		点过滤器
	Selection Filter:Edges		线过滤器
	Selection Filter:Faces		面过滤器
	Selection Filter:Bodies		体过滤器
Extend to Adjacent Extend to Limits Flood Blends Flood Area Extend to Instances	Extend Selection	Extend to Adjacent	扩展至相邻边缘或面
		Extend to Limits	扩展至 Extend to Adjacent 无法再操作
		Flood Blends	扩展至相邻圆角面
		Flood Area	从边缘扩展至所有被包围的面
		Extend to Instances	扩展至所有范例
	Expand Face Selection		扩展面选择
	Shrink Face Selection		减少面选择

（5）旋转/模式工具条　图 3-7 所示为旋转/模式工具条，各个按钮的用途依次为：旋转、全视图模式、放大、区域放大、适合窗口、窗口缩放、前次视图、后次视图、等测图和剖切面。

（6）显示工具条　图 3-8 所示为显示工具条，其 4 个按钮的功能分别为显示平面、显示模型、显示点和正对面/草图。



图 3-7　旋转/模式工具条



图 3-8　显示工具条

（7）图形选项工具条　图 3-9 所示为图形选项工具条，各个按钮的功能依次为面颜色选取、边缘颜色选取、自由边缘显示选项、一个面共享边缘显示选项、两个面共享边缘显示选项、三个面共享边缘显示选项、多个面共享边缘显示选项、边缘方向显示选项和顶点显示选项。

（8）激活平面/草图工具条　图 3-10 所示为激活平面/草图工具条，依次包含激活平面下拉菜单、新建平面操作、激活草图下拉菜单和新建草图操作。



图 3-9　图形选项工具条



图 3-10　激活平面/草图工具条

（9）特征工具条 图 3-11 所示为特征工具条。其中，“Generate”为模型重建按钮；“Share Topology”为模型增加或删除分享拓扑结构的按钮；“Parameters”为参数按钮；其余按钮功能可以从表 3-2～表 3-4 中找到。

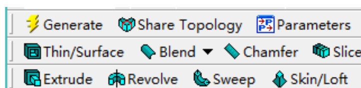


图 3-11 特征工具条

2．导航树和草图工具箱

导航树和草图工具箱有两个选项卡，两个选项卡对应的视图如图 3-12 所示。相关的功能将在本章其他部分讲述。

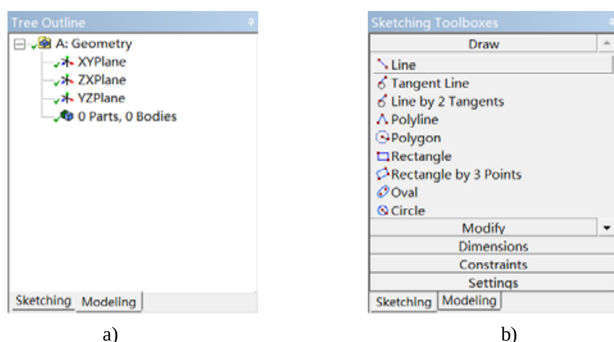


图 3-12 导航树和草图工具箱

a) 导航树 b) 草图工具箱

3．图形窗口

图形窗口有两个选项卡。其中，“Model View”选项卡为二维草图和三维模型的显示提供了空间；另一个选项卡“Print Preview”为打印视图提供了预览功能。

4．细节窗口

细节窗口提供了细节浏览和修改功能。图 3-13 所示是一个常见的细节窗口。细节窗口中的数据对建模和分析有很大的作用，应在操作时引起足够重视。

5．状态条

状态条为支持用户进行操作提供信息，在使用 DM 时应注意参考。

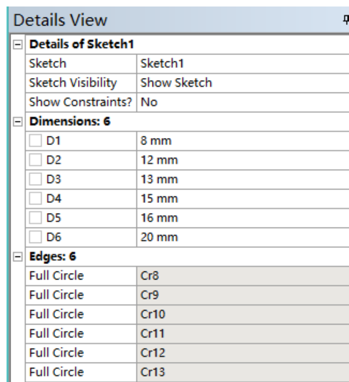


图 3-13 细节窗口

3.2 项目工程图操作

在项目工程图中，几何模型的输入（无论是建模或是导入 CAD 模型）均由 DM 完成。本节介绍在项目工程图中对 DM 系统或分析项的操作。

3.2.1 项目工程图中的 DM 和 CAD

通过双击系统工具箱中的“Geometry”可以向项目工程图中添加一个单独的 DM 系统，如图 3-14 所示。在第二行“Geometry”项上右击，弹出快捷菜单，如图 3-15 所示。通过该快捷菜单，可以实现 DM 在项目工程图的一般操作。



也可以通过添加其他系统来向项目工程图中添加 DM 应用。如图 3-16 所示，系统 Static Structural（ANSYS）便包含了 DM 应用。

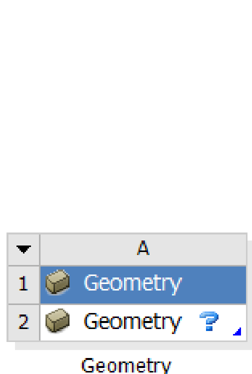


图 3-14　添加单独的 DM 系统

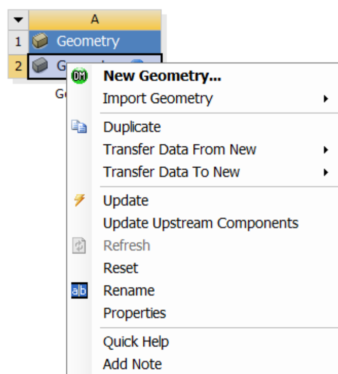


图 3-15　DM 快捷菜单

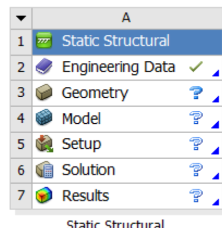


图 3-16　其他系统中的 DM

CAD 文件既可以通过在项目工程图或 DM 软件中进行导入而进入 Workbench，也可以通过 CAD 系统中的 ANSYS 17.0 菜单直接导入。导入后得到的 Geometry 如图 3-17 所示。如果导入后，被导入的引用文件不存在于源位置上，在图标上将显示一个红色的图标，如图 3-18 所示。

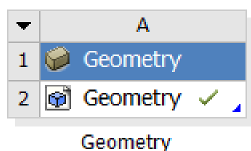


图 3-17　导入了 CAD（SolidWorks）文件

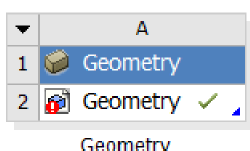


图 3-18　引用文件不存在

3.2.2　项目工程图中的 DM 操作

本节将叙述在项目工程图中对 DM 应用的一些操作，包括快捷菜单操作、属性表、项目文件表和数据操作。

1．快捷菜单操作

在项目工程图中打开的 DM 快捷菜单如图 3-15 所示。下面简单介绍各个菜单项。

- New Design Modeler Geometry：该选项将打开 DM 软件，此时可以建立新的几何模型。
- Import Geometry：使用该选项可以导入 CAD 几何模型。
- Edit Geometry in Design Modeler：该选项在图 3-15 中没有，可以参考图 3-19 所示。使用该选项，可以打开 DM 编辑导入的 CAD 模型。
- Edit Geometry in Space Claim Direct Modeler：该选项在图 3-15 中没有，可以参考图 3-19 所示。该选项可以打开一个 Space Claim 会话提供编辑功能。
- Replace Geometry：该选项在图 3-15 中没有，可以参考图 3-19 所示。该选项可以将现有的 CAD 模型替换为新的 CAD 模型。

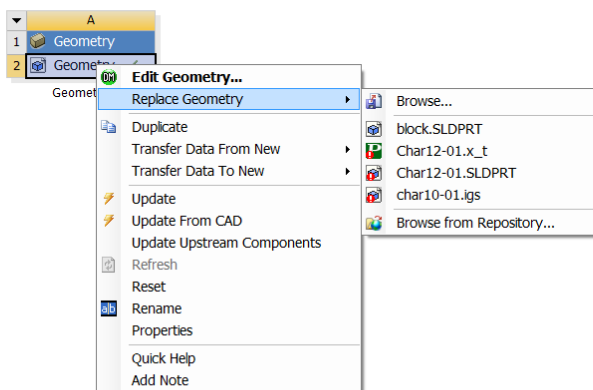


图 3-19　DM 快捷菜单（导入 CAD 模型后）

➢ Duplicate：该选项将当前系统复制到一个新的系统中。根据对象的不同，复制后的结果也不同。

如果该系统为一个几何建模系统，现有的数据将被直接复制到新系统中，如图 3-20 所示。

如果该系统为一个包含几何建模的大系统，且在“Geometry”项以上进行复制，则在“Geometry”项以上的内容将被共享，如图 3-21 所示。



图 3-20　复制 Geometry 系统

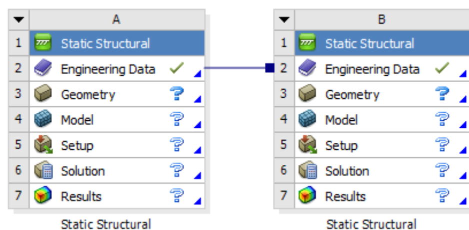


图 3-21　“Geometry”项上复制系统

如果该系统为一个包含几何建模的大系统，且在“Geometry”项以下进行复制，则在“Geometry”项以下（包括该项）的内容将被共享，如图 3-22 所示。

如果该系统为一个包含几何建模的大系统，且在“Geometry”项以下多级处进行复制，则在该级以上（包括该项）的内容将被共享，如图 3-23 所示。

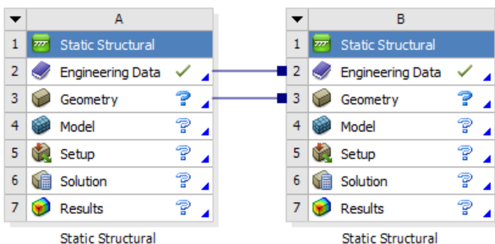


图 3-22　“Geometry”项下复制系统

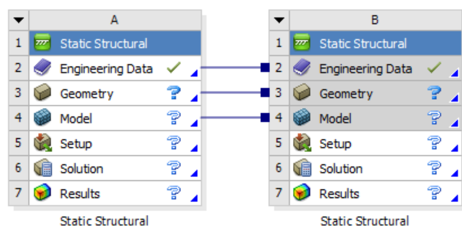


图 3-23　“Geometry”项下多级处复制系统



➢ Transfer Data From New：该选项提供了一个被指向的连接（从一个新的上游系统到该“Geometry”项），菜单操作如图 3-24 所示，结果如图 3-25 所示。

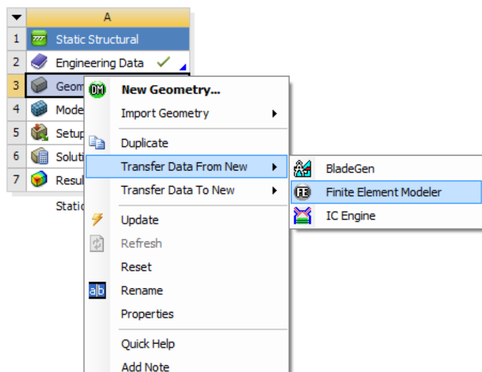


图 3-24　Transfer Data From New 菜单操作

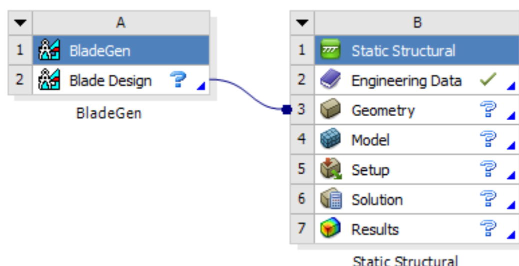


图 3-25　Transfer Data From New 操作结果

➢ Transfer Data to New：该选项提供了一个指向的连接（从该“Geometry”项到一个新的下游系统），菜单操作如图 3-26 所示，结果如图 3-27 所示。

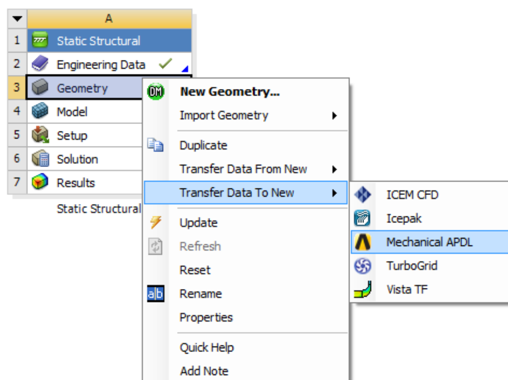


图 3-26　Transfer Data to New 菜单操作

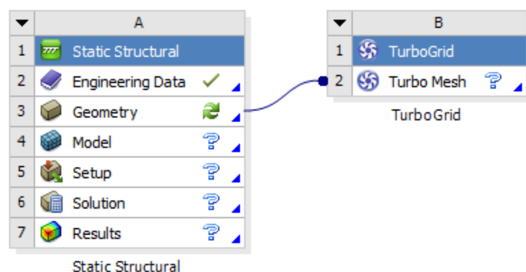


图 3-27　Transfer Data to New 操作结果

➢ Update：该选项将强制“Geometry”项的几何模型更新。
➢ Update From CAD：该选项在图 3-15 中没有，可以参考图 3-19 所示。该选项可强制将“Geometry”项的几何模型更新至 CAD 软件中得到的最新几何模型。
➢ Refresh：该选项将强制 DM 软件刷新上游输入数据。
➢ Reset：该选项将强制清空 DM 应用上的数据。
➢ Rename：对选定的项重新命名。
➢ Properties：显示“属性”面板（或属性表），如图 3-28 所示。
➢ Quick Help：启动“快速帮助”对话框。

2. 属性表

每个“Geometry”项都包含了一个导入参数的属性表。这些参数在“属性”面板中可以看到，如图 3-28 所示。

	A	B
1	Property	Value
2	⊟ General	
3	Component ID	Geometry
4	Directory Name	Geom
5	⊟ Notes	
6	Notes	
7	⊟ Used Licenses	
8	Last Update Used Licenses	
9	⊟ Geometry Source	
10	Geometry File Name	E:\Install\all_fillet.SLDPRT
11	⊟ Basic Geometry Options	
12	Solid Bodies	☑
13	Surface Bodies	☑
14	Line Bodies	☐
15	Parameters	☑
16	Parameter Key	DS
17	Attributes	☐
18	Named Selections	☐
19	Material Properties	☐
20	⊟ Advanced Geometry Options	
21	Analysis Type	3D
22	Use Associativity	☑
23	Import Coordinate Systems	☐
24	Import Work Points	☐
25	Reader Mode Saves Updated File	☐
26	Import Using Instances	☑
27	Smart CAD Update	☐
28	Compare Parts On Update	No
29	Enclosure and Symmetry Processing	☑
30	Decompose Disjoint Geometry	☑
31	Mixed Import Resolution	None

图 3-28 “属性”面板

导入模型后，在 DM 软件中将可以看到导入模型的属性细节，如图 3-29 所示。注意其中的“Parameter Key”将过滤 CAD 模型中带来的参数。

ANSYS Mechanical 应用还会显示几何模型导入参数设置，如图 3-30 所示。但要注意，该图中的参数均不能直接编辑。

⊟ Details of Attach1	
Attach	Attach1
Source	beamplate.ipt
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Process Solid Bodies	Yes
Process Surface Bodies	Yes
Process Line Bodies	No
Import Parameters?	Yes
Parameter Key	DS
Import Material Properties?	No
Import Coordinate Systems?	No
Import Attributes?	No
Import Named Selections?	No
Import Points?	No
Do Smart Update?	No
Save Modified Part File?	No
Simplify Geometry?	No
Heal Bodies?	Yes
Clean Bodies?	Yes
Mixed Import Resolution	None

图 3-29 导入模型的属性细节

Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	No
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	No
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

图 3-30 几何模型导入参数设置

3．项目文件表

典型的项目文件列表如图 3-31 所示。在 Geometry 中有 3 种来源的文件均可以在项目文件表中找到：

1）项目工程图中的*.agdb 和*.scdoc 文件。

2）*.agdb 文件中使用的被导入的 CAD 文件。

3）项目工程图中使用的 CAD 文件。

Files

	A	B	C	D	E	
1	Name	Cell ID	Size	Type	Date Modified	
2	SYS.agdb	A3	2 MB	Geometry File	2014/3/7 18:25:54	G:\workbench examp
3	material.engd	A2	18 KB	Engineering Data File	2014/3/7 18:25:40	G:\workbench examp
4	SYS.engd	A4	18 KB	Engineering Data File	2014/3/7 18:25:40	G:\workbench examp \MECH
5	SYS.mechdb	A4	96 KB	Mechanical Database File	2014/3/12 22:08:37	G:\workbench examp \MECH
6	EngineeringData.xml	A2	17 KB	Engineering Data File	2014/3/12 22:15:24	G:\workbench examp
7	parameters.dxdb	B2,B3,C2,D	1 MB	DesignXplorer Database File	2014/3/12 22:15:26	G:\workbench examp
8	parameters.params	B2,B3,C2,D	161 KB	Parameters Database File	2014/3/12 22:15:26	G:\workbench examp
9	DX.wbpj		1 MB	Workbench Project File	2014/3/12 22:15:28	G:\workbench examp
10	CAERep.xml	A1	13 KB	.xml	2014/3/7 18:33:22	G:\workbench examp
11	CAERepOutput.xml	A1	849 B	.xml	2014/3/7 18:33:27	G:\workbench examp
12	ds.dat	A1	193 KB	.dat	2014/3/7 18:33:22	G:\workbench examp

图 3-31　项目文件列表

4．数据操作

“Geometry”项中的数据可以在不同的多个系统中进行分享。通常情况下，任何包含“Geometry”项的系统均有向外分享或提供数据的能力。

“分享”或“提供”是项目工程图中两种不同的连接方式（图 3-32）：

➢ 分享（Shares-With）：数据在两个不同系统的项中分享，对一个系统中的数据进行修改也将导致另一个系统中的数据改变。连接采用的图标为方形。

➢ 提供（Provides-To）：数据由上游项往下游项传递，上游项中的改变将反映到下游项中。连接采用的图标为圆形。



图 3-32　数据连接方式

a) 分享（Shares-With）　b) 提供（Provides-To）

分享连接方式可以将“Geometry”项中的数据向任意多的系统中传递，但无论如何应该记住：任何分析的来源是唯一的。如图 3-33 所示，分享链接将系统 B 的数据分享到系统 C 和系统 D 中，但任何分析的数据源头均只有一个系统 A。

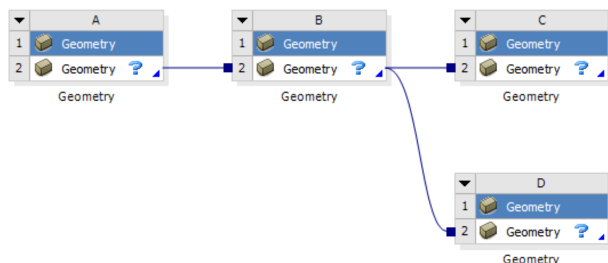


图 3-33　分享链接实现数据共享

3.2.3 项目工程图中的 DM 参数

在 DM 中创建或导入 CAD 文件后，DM 直接向 ANSYS Workbench 发布设计参数。由 DM 直接创建的参数，不需要经过过滤，可以直接进入项目工程图中。图 3-34 所示是一个带参数的 Geometry 系统与其参数列表。

CAD 文件中的参数，经过特殊命名也可以导入到 ANSYS Workbench 中，默认情况下，可以设置参数名带前缀“DS_”进行处理。但 CAD 文件中的参数通常无量纲，应注意在使用时设置合适的单位作为量纲。

图 3-34　带参数的 Geometry 系统与其参数列表

3.3　二维绘图

由二维绘图得到的草图是进行三维建模的基础。本节将详细介绍二维绘图相关内容。

3.3.1 草图与平面

首先必须理解的是，所有的草图都是在平面上创建的，有平面才有草图的绘制空间；但是平面上未必会有草图存在。

平面包括由软件自带的全局坐标系定义的 3 个平面，以及通过自定义坐标系或模型的面创建的平面。当选取的平面上没有草图时，进入绘制草图环境后，软件将自动在该平面上创建草图。

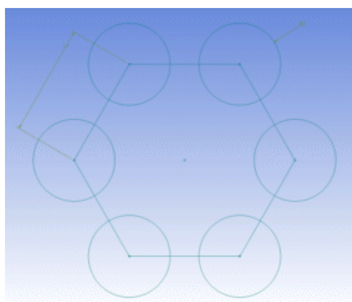
草图创建后，可以使用草图进行三维建模。随着草图的更改，建成的三维模型可以按新的草图进行重建。对没有进行三维特征构造的草图，可以通过树结构图直接删除。

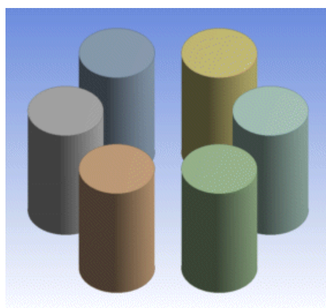
草图的一个很重要的功能是作为辅助图存在。通过该图控制其他草图上构建的几何构型进行控制，如尺寸和位置控制等。如图 3-35 所示，创建了沿着圆周分布的 6 个孔，以该图为基准来创建其他草图。虽然该图没有使用，但却通过它创建了如图 3-36 所示的三维实体。

DM 中通过草图中线或点的颜色可以判断草图的约束状态。对于线或点而言，不同颜色代表的意义如下。

- 青色：欠约束。
- 蓝色：约束足够。

➢ 黑色：固定。
➢ 红色：过约束。
➢ 灰色：不联系。


图 3-35　进行构造的草图


图 3-36　创建的三维实体

3.3.2 自动约束

在绘制草图时，如果打开了自动约束游标功能，在出现特殊情况时将会出现的提示如下。

➢ 重合：显示字母 C。
➢ 重合点：显示字母 P。
➢ 水平：显示字母 H。
➢ 竖直：显示字母 V。
➢ 平行：显示符号//。
➢ 垂直：显示符号⊥。
➢ 等半径：显示字母 R。

3.3.3 细节查看窗口

在草图绘制模式中，可以查看以下 3 种细节。

1）草图细节。

2）边缘细节。

3）尺寸细节。

所有的细节都已被分门别类地放在了细节窗口中。

1．草图细节窗口

草图细节窗口如图 3-37 所示。其各项的意义如下。

（1）Details of Sketch:*n*　该组为草图细节组，包括 3 个项目。

➢ Sketch——显示草图的名称。
➢ Sketch Visibility——设置草图的可见性，可设置为：

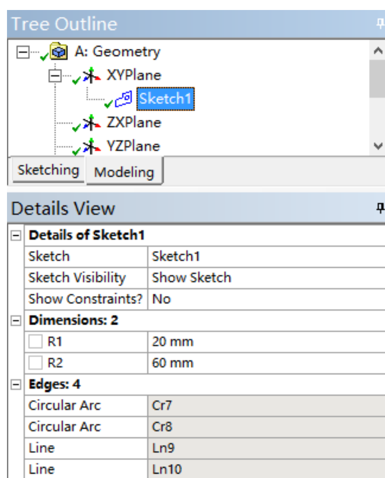


图 3-37　草图细节窗口

- Always Show Sketch：总是显示草图。
- Show Sketch：显示草图。
- Hide Sketch：隐藏草图。

➢ Show Constraints?——是否显示草图约束。

（2）Dimensions:*n*　该组在图 3-37 中没有，但在草图中存在尺寸标注时将出现。该组显示草图的尺寸，可进行更改和参数化设置。

（3）Edges:*n*　该组列出了草图中所有边缘的情况。

（4）Edge Type Name　在打开是否显示草图约束选项后，该组将出现，其显示边缘的类型。选择相应类型，该类型的所有边缘将被选取。

（5）Points:*n*　该组列出草图中点的情况。

（6）References:*n*　该组列出草图参照其他草图中点和边缘的情况。

2．边缘细节窗口

（1）Details of…　在模型视图区域选择边缘后，边缘细节窗口将出现，如图 3-38 所示。边缘细节窗口的第一个组便是该组。该组依次显示边缘的名称、草图名称、长度、角度、约束情况等。

（2）Point…Base/End　这两个组显示边缘的起点和终点信息。

3．尺寸细节窗口

尺寸细节窗口如图 3-39 所示。在视图中选择一个尺寸后该窗口将出现，其各项的含义可以参考前文中出现的相似项。

Details View

Details of Ln9	
Line	Ln9
Sketch	Sketch1
Length	40 mm
Angle	90 °
Constraint Status	Well Defined
Vertical	Axis Line YAxis
Point Ln9.Base	
X coordinate	0 mm
Y coordinate	20 mm
Constraint Status	Well Defined
Coincident	Point Cr7.Base
Point Ln9.End	
X coordinate	0 mm
Y coordinate	60 mm
Constraint Status	Well Defined
Coincident	Point Cr8.Base

图 3-38　边缘细节窗口

Details View

Details of R1	
Radius	R1
Value	20 mm
Cr7	Sketch1
Reference Only?	No
Update position with geometry?	Yes

图 3-39　尺寸细节窗口

3.3.4 绘图工具箱

进入草图绘制模式后，在工具箱区域默认出现的便是绘图工具箱。该工具箱中的工具项说明见表 3-7。

表 3-7 绘图工具箱

图 形	项 目	说 明
	Line	直线
	Tangent Line	切线
	Line by 2 Tangents	具有两个切点的直线
	Polyline	多段线
	Polygon	多边形
	Rectangle	长方形
	Rectangle by 3 Points	3 点确定的长方形
	Oval	椭圆形
	Circle	圆形
	Circle by 3 Tangents	通过 3 个切点的圆
	Arc by Tangent	由切点构造的圆弧
	Arc by 3 Points	通过 3 点的圆弧
	Arc by Center	由中心构造的圆弧
	Ellipse	椭圆
	Spline	样条曲线
	Construction Point	构造点
	Construction Point at Intersection	交点构造点

3.3.5 修改工具箱

修改工具箱的图形和项目说明见表 3-8。

表 3-8 修改工具箱

图 形	项 目	说 明
	Fillet	倒圆角
	Chamfer	倒角
	Corner	自动生成拐角
	Trim	修剪
	Extend	延伸
	Split	分割
	Drag	拉伸
	Cut	剪切
	Copy	复制
	Paste	粘贴
	Move	移动
	Replicate	重复
	Duplicate	生成副本
	Offset	偏移
	Spline Edit	编辑样条曲线

3.3.6 尺寸工具箱

使用尺寸工具箱中的工具可以定义草图尺寸。该工具箱的图形和功能项说明见表 3-9。

表 3-9　尺寸工具箱

图　形	项　目	说　明
	General	通用尺寸
	Horizontal	水平尺寸
	Vertical	竖直尺寸
	Length/Distance	长度/距离
	Radius	半径
	Diameter	直径
	Angle	角度
	Semi-Automatic	半自动标注
	Edit	编辑
	Move	移动
	Animate	驱动约束
	Display	显示（名称/数值）

3.3.7 约束工具箱

使用约束工具箱中的工具可以约束草图，该工具箱的图形和功能项说明见表 3-10。

表 3-10　约束工具箱

图　形	项　目	说　明
	Fixed	固定
	Horizontal	水平
	Vertical	竖直
	Perpendicular	垂直
	Tangent	相切
	Coincident	重合
	Midpoint	中间点
	Symmetry	对称
	Parallel	平行
	Concentric	同心
	Equal Radius	等半径
	Equal Length	等长度
	Equal Distance	等距离
	Auto Constraints	自动约束

3.3.8 设置工具箱

设置工具箱可以设置草图的绘图背景，其图形和功能项说明见表 3-11。

表 3-11　设置工具箱

图　　形	项　　目	说　　明
	Grid	栅格显示
	Major Grid Spacing	大间距栅格
	Minor-Steps per Major	小间距栅格
	Snaps per Minor	小间距栅格距离

3.4　建模

在 DM 中建模主要包括进行三维建模和概念建模，本节介绍一些建模常使用到的工具。

3.4.1 体和零件

在 DM 的树结构图中，包括模型的体和零件。体是模型的单个组件，而零件则是一系列体的组合。每个体或零件的细节窗口中均提供了体或零件的统计数据，图 3-40 所示为单体零件的细节窗口，而对于多体零件，则细节窗口将多出一项“Shared Topology Method”，如图 3-41 所示。

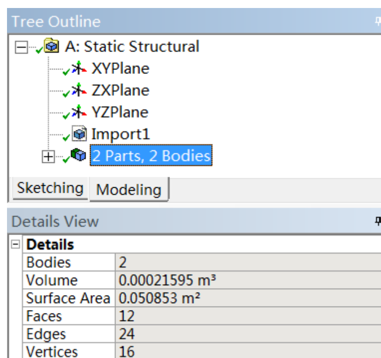


图 3-40　细节窗口

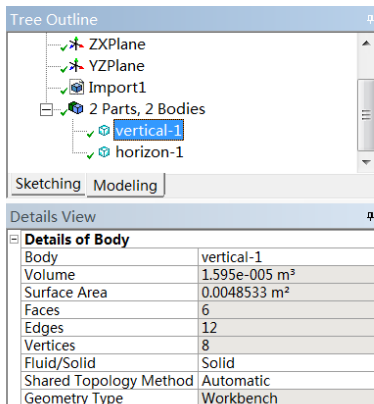


图 3-41　多体零件细节窗口

1. 体

（1）体的激活状态　在 DM 中，体具有两种激活状态，如下所述。

- 代表激活状态，可以用于各种正常的建模操作。可以使用工具栏中的“Freeze”命令，对激活状态的体进行冻结操作。

➢ 代表冻结状态，仅可以用于 slicing 建模操作。使用工具栏中的“Unfreeze”命令可以，对冻结状态的体进行激活操作。

（2）体的类型 DM 共支持 5 种类型的体，如下所述。

➢ 三维实体——具有表面和体积。
➢ 面实体——具有表面没有体积。
➢ 线实体——具有边，没有表面和体积。
➢ 平面——位于 *XY* 平面上的面实体。
➢ 绕组——具有边，没有表面和体积。

注意：*对于面而言，可以设置为具有厚度的，也可以设置厚度为 0。DM 中面实体的厚度模式 Thickness Mode 有两种：*

➢ Refresh on Update —— *当面实体重新生成时，其厚度将被自动计算和更新。*
➢ Manual —— *必须进行手动输入；当面实体重新生成时，其厚度将保持不变。*

当用户对 Thickness 进行输入时，则“Thickness Mode”将自动被设置为“Manual”，如图 3-42 所示。

除此之外，还可以对面实体中的面进行统一设置，这时“Thickness Mode”将显示“Refresh on Update”，如图 3-43 所示。

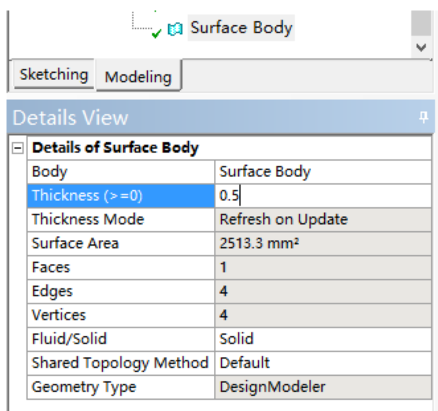


图 3-42 手动设置厚度

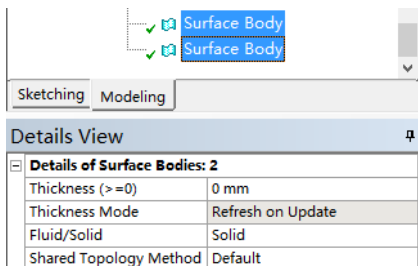


图 3-43 面实体厚度统一设置

（3）体的状态 体的状态包括 3 种，如下所述。

➢ ——体处于可视状态。
➢ ——体处于隐藏状态。
➢ ——体处于被抑制状态。

2. 零件

在体被集成到多体零件中时，不同的体之间将发生拓扑分享。拓扑分享允许在体接触时，无需定义接触直接进行网格划分。例如，图中完全相同的模型在划分网格后得到图形，图 3-44 所示为没有进行拓扑分享，图 3-45 所示则是进行了拓扑分享。两图中体操作的区别在于，后者所有的体均被集成到多体零件中了。

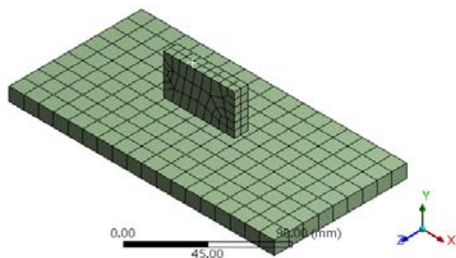


图 3-44　没有进行拓扑分享

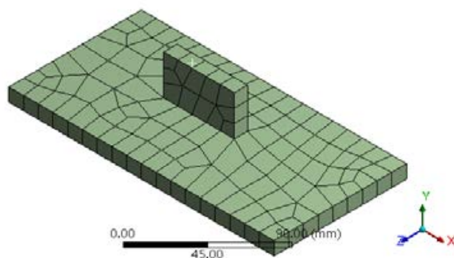


图 3-45　进行拓扑分享

在 DM 中，进行拓扑分享有 4 个选项。

- Edge Joints——进行边缘连接。
- Automatic——使用布尔操作进行连接。
- Imprints——该方法常用于需要获得定义完整的接触时，并不进行实际的拓扑分享。
- None——不进行拓扑分享。

各个选项对零件类型的支持见表 3-12 所示。

表 3-12　拓扑分享选项对零件类型的支持

零 件 类 型	拓扑分享选项
仅有线实体	Edge Joints
线实体与面实体	Edge Joints
仅有面实体	Edge Joints,Automatic,Imprints,None
仅有体实体	Automatic,Imprints,None
面实体和体实体	Automatic,Imprints,None

3．组建新零件

零件可以通过“Form New Part”命令来组建新的零件，此时得到的新零件将进行拓扑分享。进行该操作的方法可以为：选择待操作的零件，并右击，在弹出的快捷菜单中选择“Form New Part”，此时将得到新零件图标为。

下面是一些组建新零件的示例。

对已有的多体零件和其他零件进行了组合创建新零件，如图 3-46 所示。

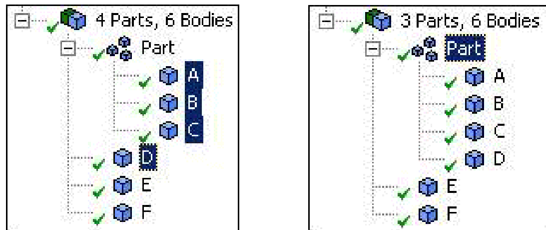


图 3-46　对已有的多体零件和其他零件进行了组合创建新零件

对已有的多体零件进行了组合创建新零件，如图 3–47 所示。

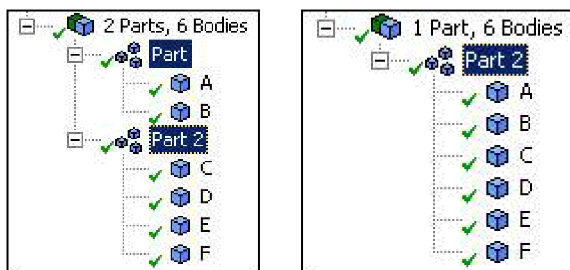


图 3–47　对已有的多体零件进行了组合创建新零件

对已有的多体零件的部分进行了组合创建新零件，如图 3–48 所示。

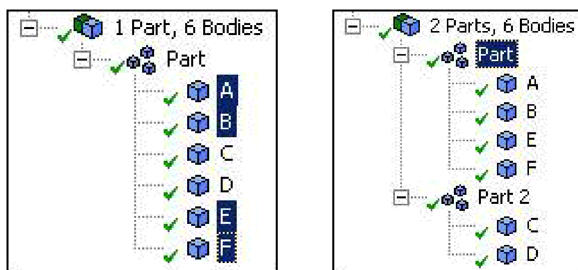


图 3–48　对已有的多体零件的部分进行了组合创建新零件

4．分解零件

对于多体零件，可以采用“分解零件”命令进行分解。分解零件的具体操作为：选择需要操作的零件并右击，在弹出的快捷菜单中选择“Explode Part”。

5．零件状态

零件的状态包括可视状态、隐藏状态、被抑制状态和错误状态。

3.4.2 细节查看

在进行三维建模操作时，应注意使用细节窗口。从细节查看窗口可获取细节内容。一般的模型细节窗口内容如图 3–49 所示。

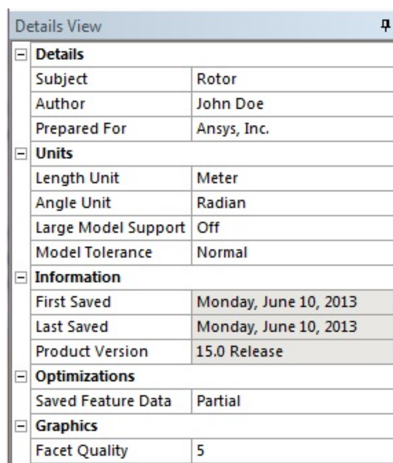


图 3–49　模型细节窗口

3.4.3 布尔操作

在 DM 中进行操作对模型的影响可以分为 3 个级别：

1）全局操作：操作影响整个模型，如在创建三维实体时自带的布尔操作。

2）局部操作：操作影响模型的局部，如对特定实体进行的布尔操作。

3）参考操作：不影响模型，但参考模型创建了实体，如创建集合。

由此可见，布尔操作是对模型有影响的，应在操作中注意。典型的布尔操作类型包括以下 5 种。

1）添加材料，如图 3–50 所示。

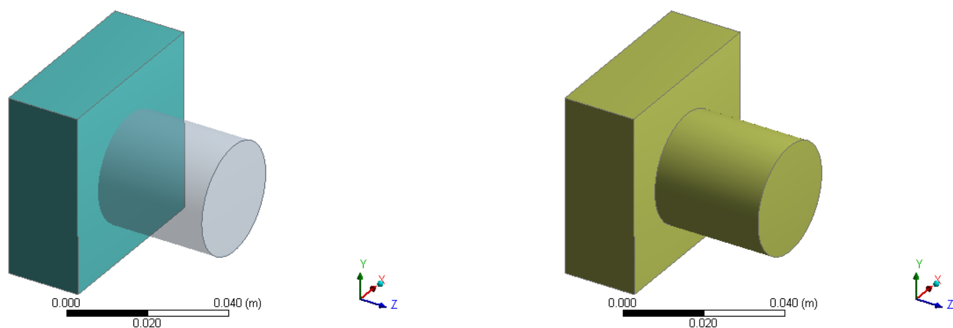


图 3–50　添加材料

2）减除材料，如图 3–51 所示。

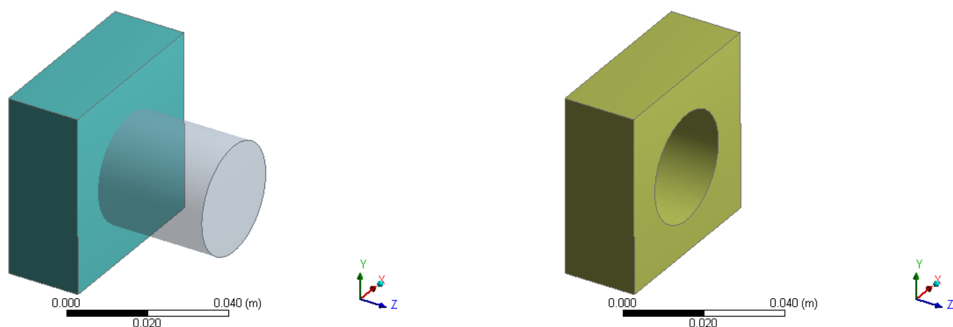


图 3–51　减除材料

3）切分材料，如图 3–52 所示。

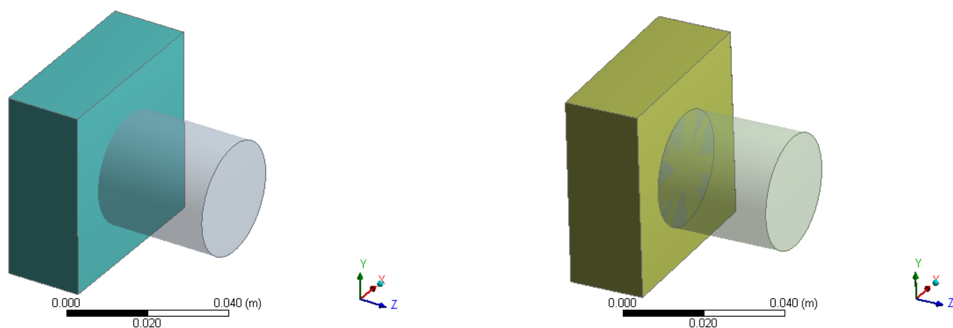


图 3–52　切分材料

4）面印痕处理，如图 3–53 所示。

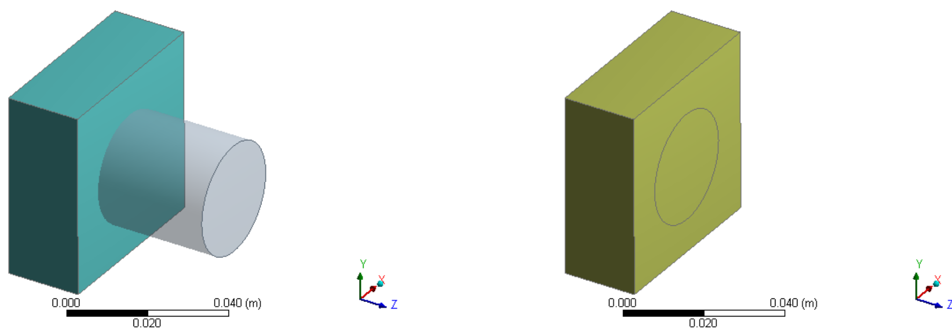


图 3-53　面印痕处理

5）添加交叉体，如图 3-54 所示。

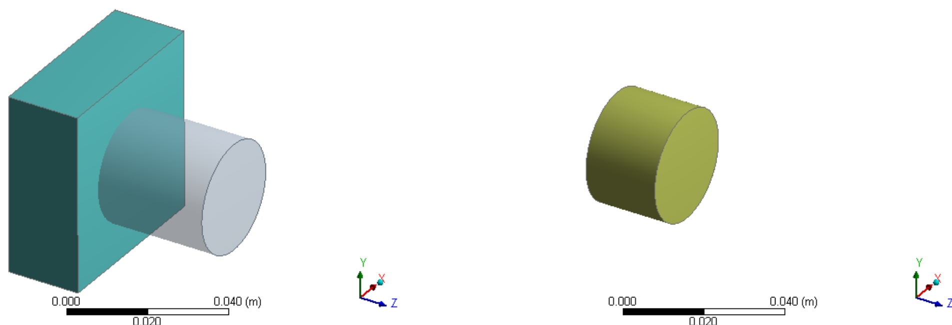


图 3-54　添加交叉体

3.4.4　三维特征

可以使用如图 3-55 所示的工具栏或使用菜单栏 Create 菜单下的相应命令创建三维特征。创建三维特征后，在树结构图中将会出现相应的三维特征操作的图标。

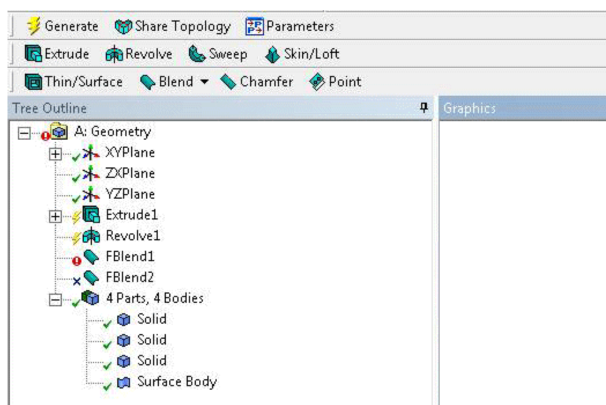


图 3-55　工具栏

首先要注意树结构图中一些图标含义。具体功能如下。

- ✔——特征成功生成。
- ⚡——特征在上次生成后有更新，需要重新生成。
- ✔——特征已经生成，但有警告信息。
- ❗——特征生成失败。
- ✕——特征被抑制。

下面介绍工具栏中部分常用命令的使用方式。

1．生成（Generate）

特征生成的操作可由 Generate 按钮执行，或直接按下〈F5〉键生成。

2．拓扑分享（Share Topology）

拓扑分享操作可由 Share Topology 按钮执行，其功能可以参考 3.4.1 节。

3．拉伸（Extrude）

拉伸操作可由 Extrude 按钮执行，其功能为从草图、面或其他低维图形中创建拉伸体。拉伸时应注意设置拉伸各个参数的设置。

1）方向向量（Direction Vector for Extrude）的设置，该向量代表的方向为拉伸体生成的方向。

2）方向设置，其代表拉伸体的朝向，有如下可选项。

- Normal——拉伸方向为 Z 轴正向。
- Reversed——拉伸方向为 Z 轴负向。
- Both–Symmetric——拉伸方向为 Z 轴双向对等长度。
- Both-Asymmetric——拉伸方向为 Z 轴双向非对等长度。

3）拉伸类型共有 5 种，以图 3-56a 为例，具体类型如下所述。

- Fixed——由细节窗口设置进行固定长度拉伸，如图 3-56b 所示。
- Through All——拉伸体将穿过整个模型，如图 3-56c 所示。
- To Next——拉伸体将拉伸至遇到的第一个面，如图 3-56d 所示。
- To Faces——拉伸体将拉伸至设置的面，如图 3-56e 所示。
- To Surface——拉伸体将拉伸至实体面所在的表面上，如图 3-56f 所示。

4．旋转（Revolve）

旋转操作可由 Revolve 按钮执行，其功能为从草图、面或其他低维图形中创建旋转体。拉伸时应注意设置旋转各个参数的设置。

1）旋转轴：在旋转前必须设置。

2）旋转方向，包括以下几种。

- Normal——旋转方向为 Z 轴正向。
- Reversed——旋转方向为 Z 轴负向。
- Both–Symmetric——旋转方向为 Z 轴双向对等角度。
- Both-Asymmetric——旋转方向为 Z 轴双向非对等角度。

5．扫掠（Sweep）

扫掠操作可由 Sweep 按钮执行，其功能为将外形根据扫掠要求生成实体。扫掠时应注意的参数包括：

1）扫掠路径（Path）：其决定了扫掠持续进行的路径。

2）对齐方向（Alignment）：其决定了扫掠时应该采取的对齐方式，包括两种。

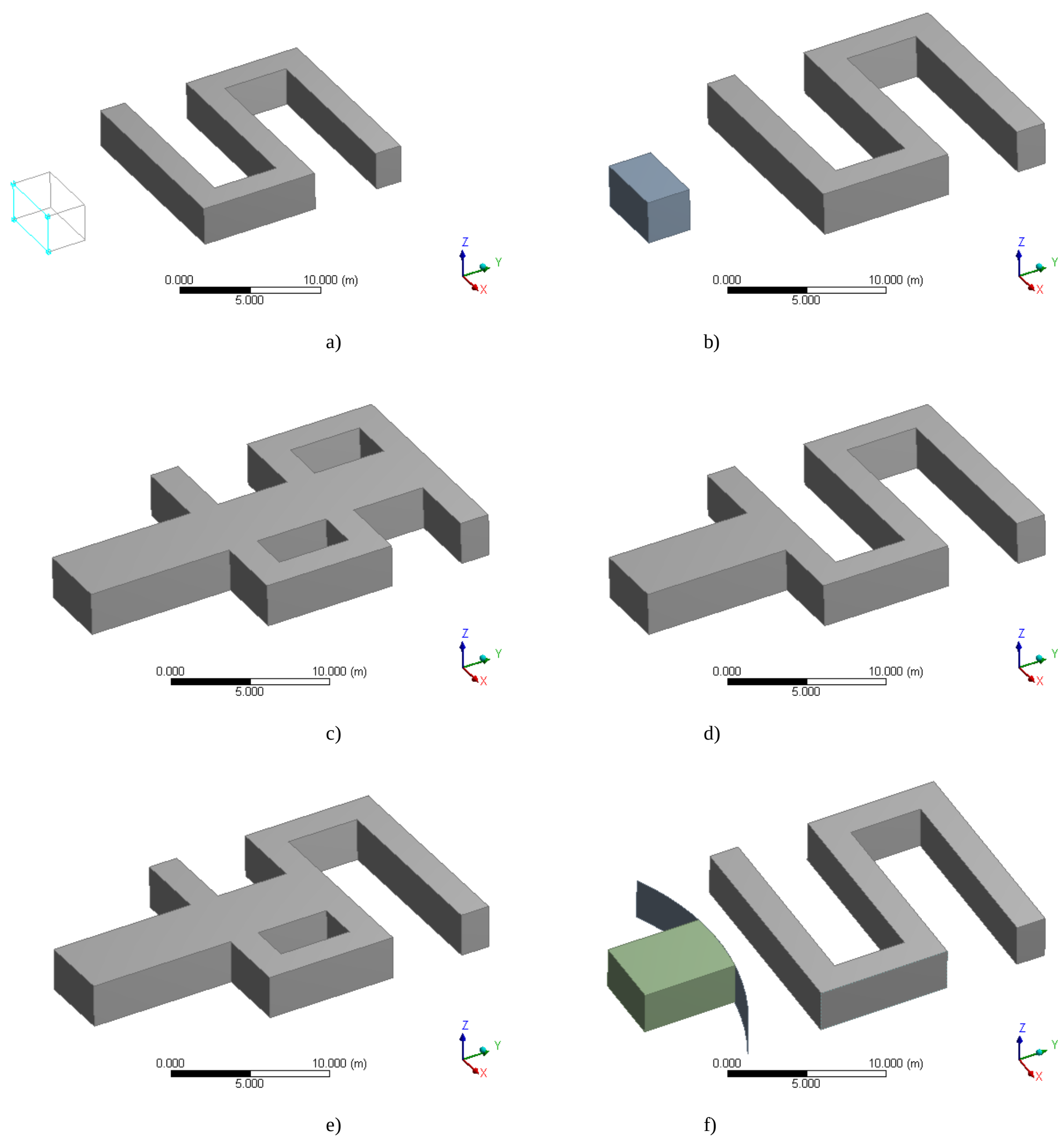


图 3-56　不同类型的拉伸

a) 拉伸前　b) 拉伸（类型 Fixed）　c) 拉伸（类型 Through All）　d) 拉伸（类型 To Next）

e) 拉伸（类型 To Faces）　f) 拉伸（类型 To Surface）

- Path Tangent——扫掠外形的方向与路径方向相切，如图 3-57a 所示。
- Global Axes——扫掠外形的方向与坐标轴的方向相同，如图 3-57b 所示。

3）缩放（Scale）：设置缩放系数。

4）扭转（Twist）：可设置为“Pinchs”和“Turns”，改变扫掠外形的扭转状态，如图 3-57c 所示。

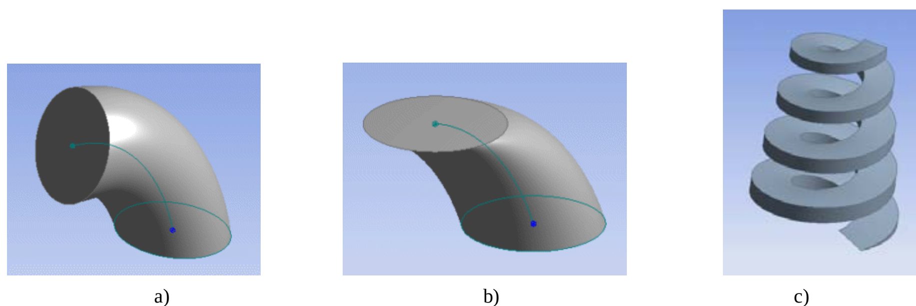

a) b) c)

图 3-57　扫掠操作

a) 对齐方式 Path Tangent　b) 对齐方式 Global Axes　c) 设置缩放和扭转

6．蒙皮/放样（Skin/Loft）

蒙皮/放样操作可由 Skin/Loft 按钮执行，其功能为根据不同位置的外形放置薄壁实体。蒙皮/放样操作时应注意选取需要蒙皮的外形和引导线。引导线不同，得到的结果可能大不相同，如图 3-58 和图 3-59 所示。

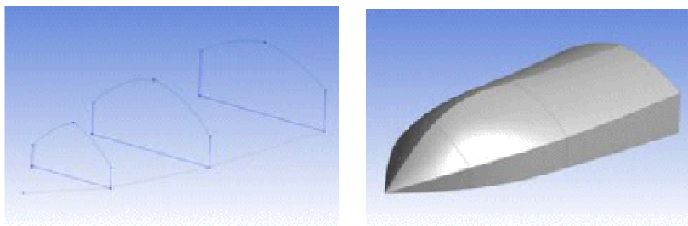


图 3-58　由最近距离点构成的引导线得到的体

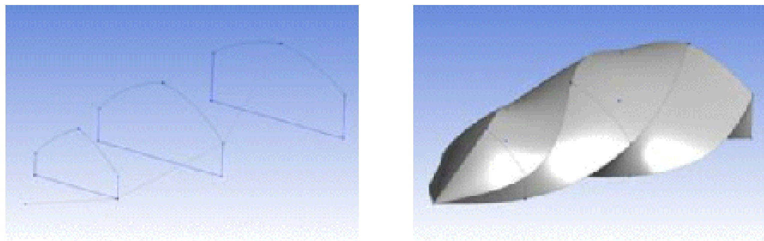


图 3-59　由非最近距离点构成的引导线得到的体

对非封闭的曲线也可以进行蒙皮/放样操作，如图 3-60 所示。

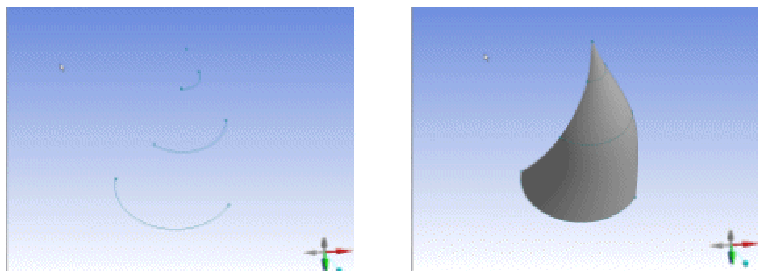


图 3-60　对非封闭的曲线进行蒙皮/放样操作

7．抽壳/薄壁特征（Thin/Surface）

抽壳/薄壁特征操作可由 Thin/Surface 按钮执行，其功能为根据实体创建壳体。图 3-61 所示为通过面实体创建薄壁特征；图 3-62 所示为通过抽壳创建实体。在操作中可设置的方式包括：

- Faces to Remove——移除所选面。
- Faces to Keep——保留所选面。
- Bodies Only——保留所有面。

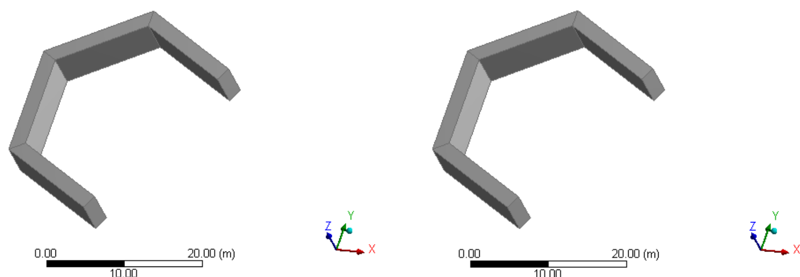


图 3-61 创建薄壁特征

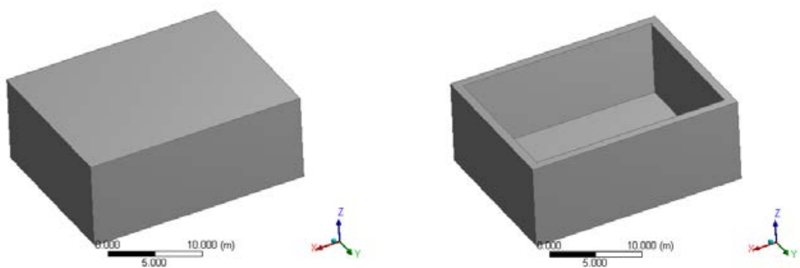


图 3-62 抽壳

8．圆角（Fixed Radius）

圆角操作需要设置圆角的半径与平滑方法，操作类型包括：

- 固定半径圆角，由 Fixed Radius 按钮提供，如图 3-63 所示。

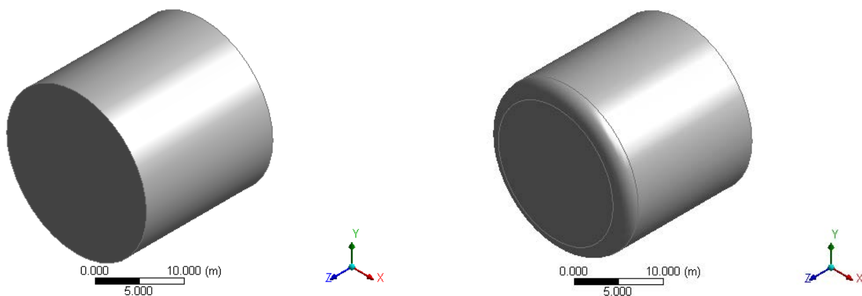


图 3-63 固定半径圆角

- 变化半径圆角，由 Variable Radius 按钮提供。
- 顶点圆角，由 Vertex Blend 按钮提供，如图 3-64 所示。



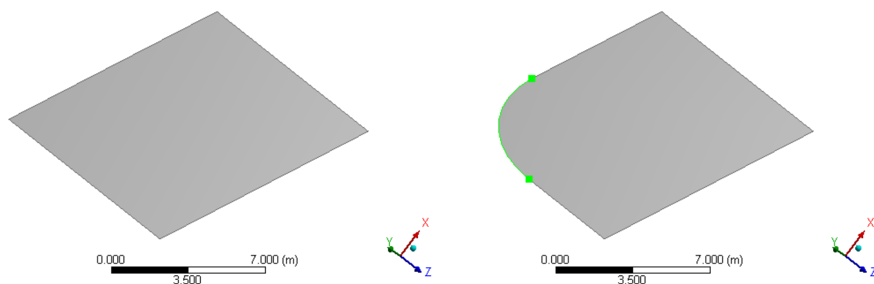


图 3-64　顶点圆角

9．倒角（Chamfer）

倒角特征操作由 Chamfer 按钮提供，其在边缘上创建倒角，需要设置的参数包括：倒角的宽度或倒角单边宽度与角度。

3.4.5 基本体

DM 提供了基本体的直接生成操作功能，可以生成的基本体包括：

- 球形，由 Sphere 按钮提供，参数如图 3-65 所示。
- 方体形，由 Box 按钮提供，参数如图 3-66 所示。
- 平行六面体，由 Parallelepiped 按钮提供，参数如图 3-67 所示。

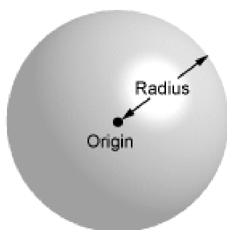


图 3-65　球形

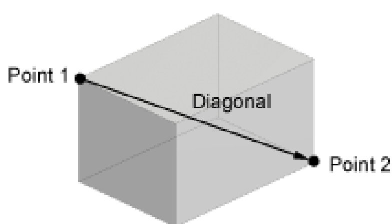


图 3-66　方形体

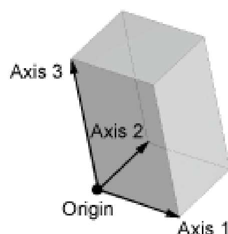


图 3-67　平行六面体

- 圆柱，由 Cylinder 按钮提供，参数如图 3-68 所示。
- 圆锥（台），由 Cone 按钮提供，参数如图 3-69 所示。
- 棱柱，由 Prism 按钮提供，参数如图 3-70 所示。

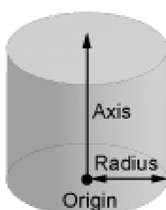


图 3-68　圆柱

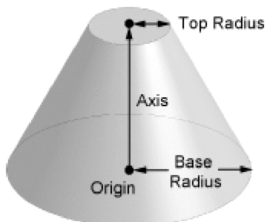


图 3-69　圆锥（台）

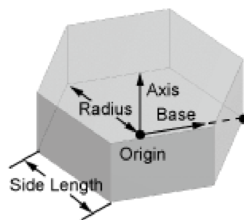


图 3-70　棱柱

- 金字塔形，由 Pyramid 按钮提供，参数如图 3-71 所示。

➢ 圆环，由 Torus 按钮提供，参数如图 3-72 所示。
➢ 矩形环，由 Bend 按钮提供，参数如图 3-73 所示。

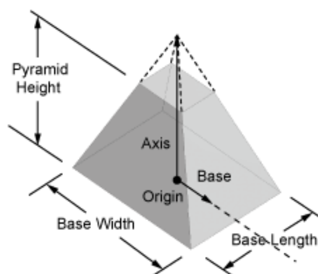


图 3-71 金字塔形

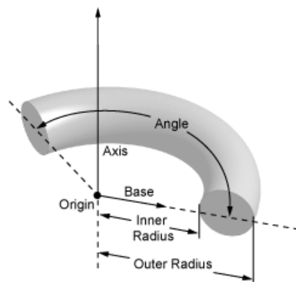


图 3-72 圆环

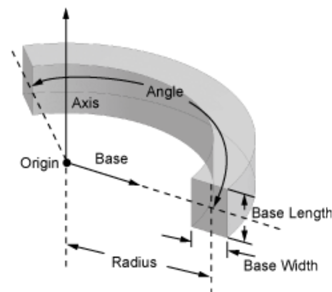


图 3-73 矩形环

3.4.6 高级特征与工具

DM 应用还提供了很多高级特征与工具用于建模，对这些工具的描述见表 3-13。

表 3-13 高级特征与工具

图 标	工 具	操 作
Freeze	Freeze	冻结激活体
Unfreeze	Unfreeze	激活冻结体
Named Selection	Named Selection	创建集合
Attribute	Attribute	创建属性集合
Mid-Surface	Mid-Surface	创建中间面
Joint	Joint	创建连接
Enclosure	Enclosure	创建包覆体
Face Split	Face Split	分割面
Symmetry	Symmetry	对称
Fill	Fill	填充体
Surface Extension	Surface Extension	延伸面
Surface Patch	Surface Patch	补充面
Surface Flip	Surface Flip	翻转面
Merge	Merge	合并
Connect	Connect	连接
Projection	Projection	投影
Conversion	Conversion	转换为 DM 体
Pattern	Pattern	创建样式
Body Operation	Body Operation	体操作
Boolean	Boolean	布尔操作
Slice	Slice	切割操作
Face Delete	Face Delete	删除面
Edge Delete	Edge Delete	删除边缘

3.4.7 概念建模

概念建模所需的菜单操作命令如图 3-74 所示，其各个菜单项的功能见表 3-14 和表 3-15。

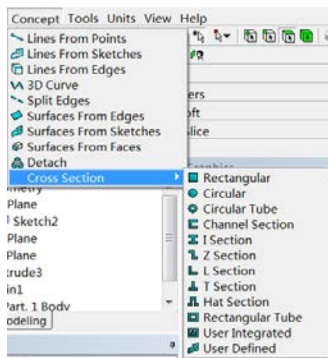


图 3-74 概念建模菜单

表 3-14 概念建模菜单

图 标	命 令	说 明
Lines From Points	Lines From Points	从点创建线体
Lines From Sketches	Lines From Sketches	从草图创建线体
Lines From Edges	Lines From Edges	从边缘创建线体
3D Curve	3D Curve	创建三维曲线体
Split Edges	Split Edges	拆分边缘
Surfaces From Edges	Surfaces From Edges	从边缘创建面体
Surfaces From Sketches	Surfaces From Sketches	从草图创建面体
Surfaces From Faces	Surfaces From Faces	从面创建面体
--	Cross Section	横截面定义

表 3-15 截面命令菜单

图 标	命 令	截 面 类 型	参 数 图
Rectangular	Rectangular	长方形截面	见图 3-75
Circular	Circular	圆形截面	见图 3-76
Circular Tube	Circular Tube	圆环形截面	见图 3-77
Channel Section	Channel Section	槽形截面	见图 3-78
I Section	I Section	工字形截面	见图 3-79
Z Section	Z Section	Z 形截面	见图 3-80
L Section	L Section	L 形截面	见图 3-81
T Section	T Section	T 形截面	见图 3-82
Hat Section	Hat Section	帽形截面	见图 3-83
Rectangular Tube	Rectangular Tube	长方孔环截面	见图 3-84
User Integrated	User Integrated	用户定义抽象截面	无
User Defined	User Defined	用户定义截面	无

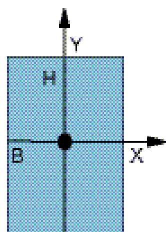


图 3-75 长方形截面

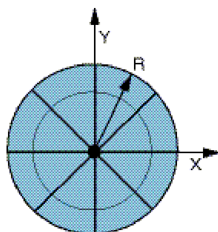


图 3-76 圆形截面

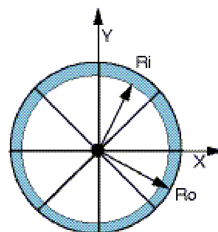


图 3-77 圆环形截面

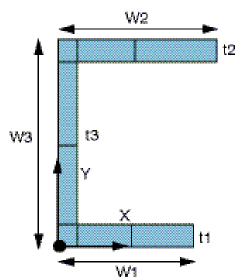


图 3-78 槽形截面

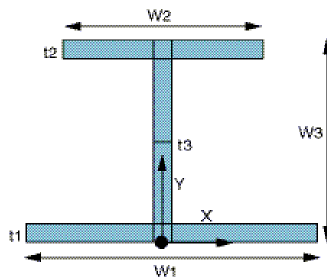


图 3-79 工字形截面

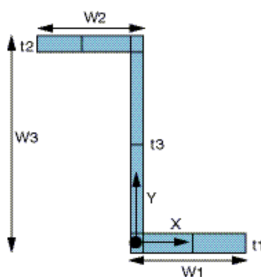


图 3-80 Z 形截面

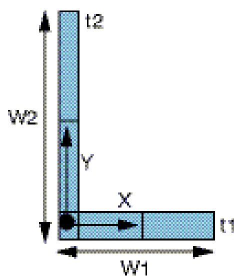


图 3-81 L 形截面

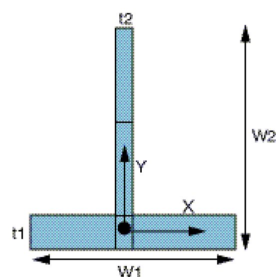


图 3-82 T 形截面

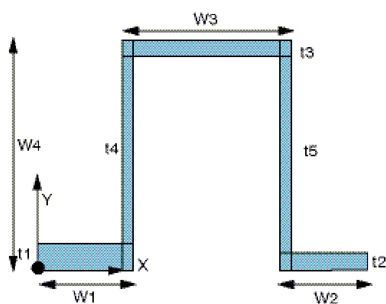


图 3-83 帽形截面

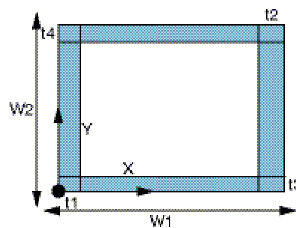


图 3-84 长方孔环截面

3.5 DM 建模示例

本节对使用 DM 进行建模的操作给出示例。

3.5.1 进入 DM

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0 并进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Component Systems”→“Static Structural”选项，在项目工程图区域内创建项目 A，如图 3-85 所示。

3）在项目 A 上右击，并在弹出的快捷菜单中选择“New Geometry”选项，如图 3-86 所示，打开 DM 界面。

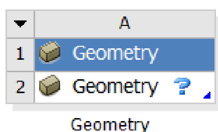


图 3-85 创建项目

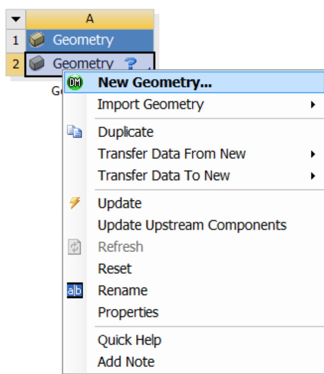


图 3-86 打开 DM

3.5.2 草图绘制

1．基座草图

1）在 DM 界面左侧的树结构图中，选择“XYPlane”选项，如图 3-87 所示。

2）单击工具栏中的“New Sketch”按钮口，此时在树结构图中的“XYPlane”选项下将生成“Sketch1”对象，如图 3-88 所示。

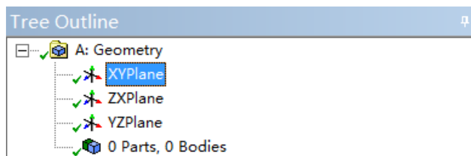


图 3-87 单击“XYPlane”

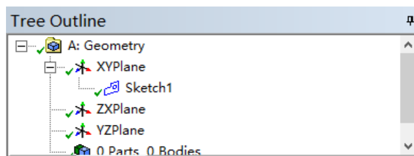


图 3-88 插入草图

3）单击“Look At Face”→“Plane”→“Sketch”按钮，重置视图使草图正对屏幕。

4）在 DM 界面左侧的树结构图下选择“Sketching”选项，并单击工具栏中的“Line”按钮口。

5）在图形区域绘制第一条竖直边。方法为单击屏幕上的一个点，移动鼠标至图形中显示“V”字母（图 3-89）；然后再单击即可得到第一条竖边。

6）在图形区域绘制第一条水平边。方法为单击竖直边上的一个点，移动鼠标至图形中显示“H”字母（图 3-90）；然后再单击即可得到第一条水平边。

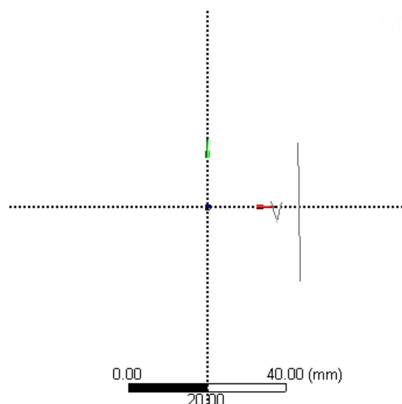


图 3-89　绘制第一条竖直边

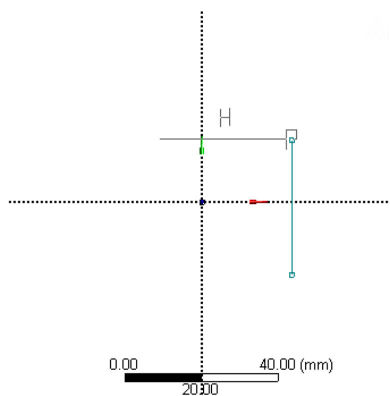


图 3-90　绘制第一条水平边

7）在图形区域绘制第二条竖直边。

8）连接形成四边形，如图 3-91 所示。

9）选择“Dimensions”→“General”命令并标注草图尺寸，如图 3-92 所示。

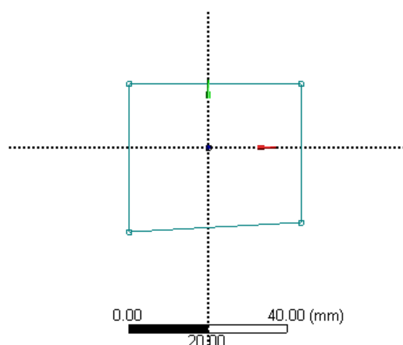


图 3-91　绘制为四边形

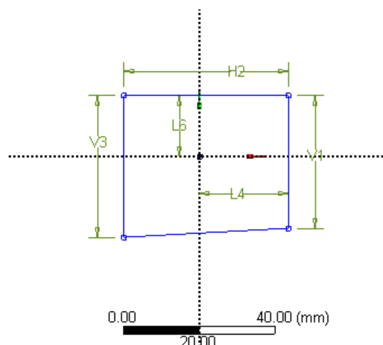


图 3-92　标注尺寸

10）修改草图中的尺寸，如图 3-93 所示。

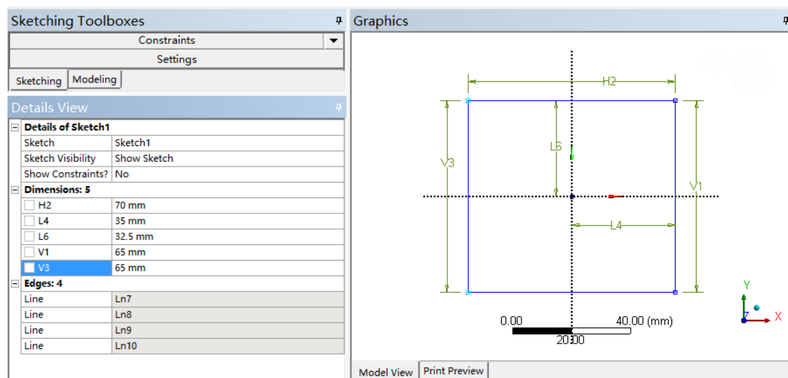


图 3-93　修改尺寸

11）单击“Modify”按钮，然后单击“Fillet”，设置“Radius”为“5mm”，如图 3-94 所示。



12）依次单击四边形的 4 个顶点，得到的图形如图 3-95 所示。

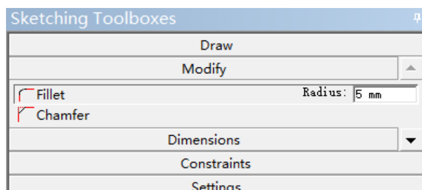


图 3-94　设置圆角半径

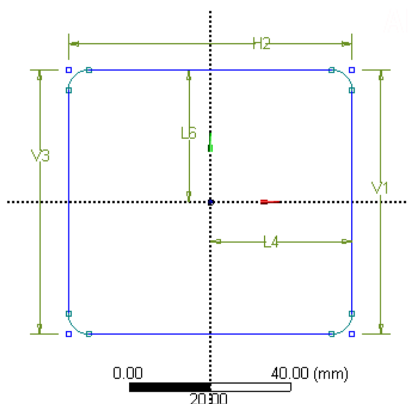


图 3-95　绘制圆角

13）单击“Modeling”回到建模界面。

14）选择“Sketch1”对象并右击，再在弹出的快捷菜单中选择“Hide Sketch”项。

2．凸起草图

1）在 DM 界面左侧树结构图中选择“XYPlane”选项。

2）单击工具栏中的“New Sketch”按钮，此时在树结构图中的“XYPlane”选项下将生成“Sketch2”，如图 3-96 所示。

3）类似于前文操作，绘制得到的图形如图 3-97 所示。

4）单击“Modeling”回到建模界面。

5）选择“Sketch2”并单击右键，再在弹出的快捷菜单中选择“Hide Sketch”项。

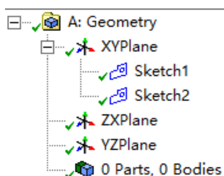


图 3-96　添加 Sketch2

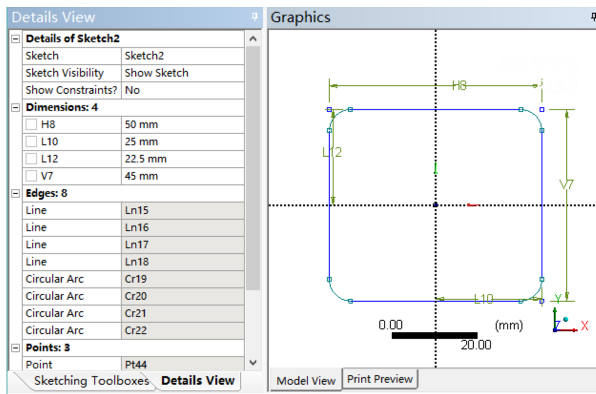


图 3-97　绘制 Sketch2

3．中心浅孔草图

1）在 DM 界面左侧树结构图中选择“XYPlane”选项。

2）单击工具栏中的“New Sketch”按钮，此时在树结构图中的“XYPlane”选项下将生成“Sketch3”。

3）在 DM 界面左侧树结构图下单击“Sketching”，并单击工具栏中的“Circle”工具按钮。

4）在草图绘制区域中单击原点，绘制圆至适当尺寸后再次单击。

5）单击“Dimensions”，选择“General”。

6）单击圆得到尺寸。

7）设置 Detail View，结果如图 3-98 所示。

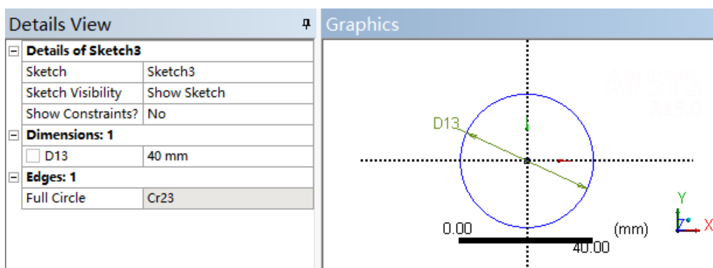


图 3-98　绘制 Sketch3

8）单击“Modeling”回到建模界面。

9）选择“Sketch3”并右击，再在弹出的快捷菜单中选择“Hide Sketch”项。

4．中心深孔草图

1）在 DM 界面左侧树结构图中选择“XYPlane”选项。

2）单击工具栏中的“New Sketch”按钮口，此时在树结构图中的“XYPlane”选项下将生成“Sketch4”。

3）类似于前文操作，绘制得到的图形如图 3-99 所示。

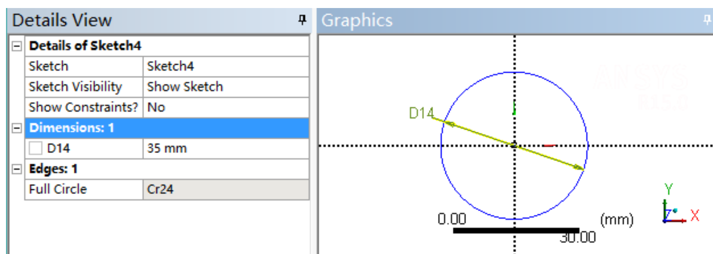


图 3-99　绘制 Sketch4

4）单击“Modeling”回到建模界面。

5）选择“Sketch4”并右击，再在弹出的快捷菜单中选择“Hide Sketch”项。

5．通孔草图

1）在 DM 界面左侧树结构图中选择“XYPlane”选项。

2）单击工具栏中的“New Sketch”按钮，此时在树结构图中的“XYPlane”选项下将生成“Sketch5”。

3）在 DM 界面左侧树结构图下单击“Sketching”，单击工具栏中的“Circle”工具按钮。

4）在草图绘制区域中单击 X 轴上的一点，绘制圆至适当尺寸后再次单击。

5）在草图绘制区域中单击 X 轴上的另一点，绘制圆至适当尺寸后再次单击。

6）在草图绘制区域中单击 *Y* 轴上的一点，绘制圆至适当尺寸后再次单击。

7）在草图绘制区域中单击 *Y* 轴上的另一点，绘制圆至适当尺寸后再次单击。

8）单击“Dimensions”，并选择“General”。

9）分别单击 4 个圆，可得到尺寸。

10）分别单击原点与 4 个圆圆心，可得到尺寸。

11）设置 Detail View，结果如图 3-100 所示。

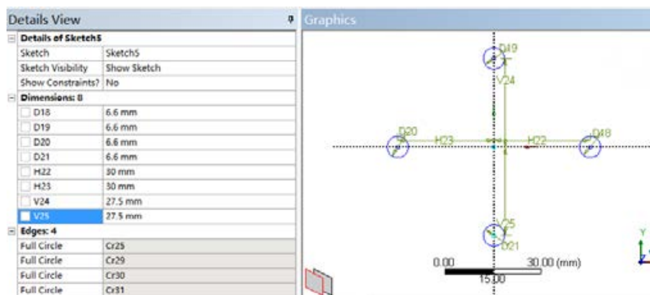


图 3-100　绘制 Sketch5

12）单击“Modeling”回到建模界面。

13）选择“Sketch1”～“Sketch4”并右击，再在弹出的快捷菜单中选择“Show Sketch”项，得到图形如图 3-101 所示。

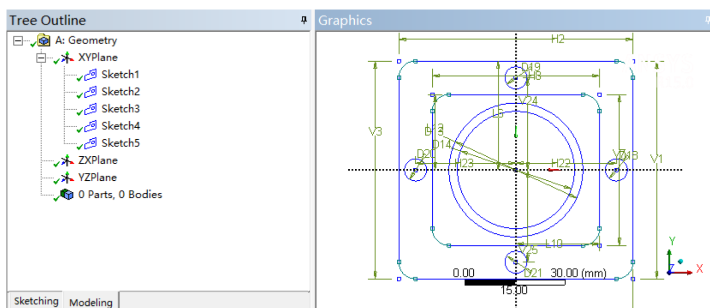


图 3-101　绘制的所有草图

3.5.3 三维建模

1．基座

1）单击工具栏中的“Extrude”按钮，创建“Extrude1”对象，如图 3-102 所示。

2）单击“Detail View”弹出细节设置窗口。

3）选择“Sketch1”对应的草图上的线，在 Detail View 中单击“Apply”按钮。

4）设置“Depth”为“8mm”，单击“Generate”，得到的图形如图 3-103 所示。

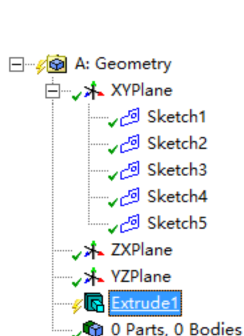
2．凸起

1）单击工具栏中的“Extrude”按钮，创建“Extrude2”对象。

2）单击“Detail View”弹出细节设置窗口。

3）选择“Sketch2”对应的草图上的线，在 Detail View 中单击“Apply”按钮。

4）设置“Depth”为“19mm”，单击“Generate”，得到的图形如图 3-104 所示。



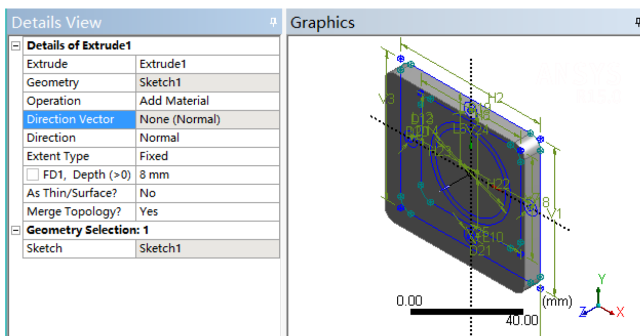


图 3-102　添加 Extrude1　　　　　　　　　图 3-103　绘制 Extrude1

3．中心浅孔

1）单击工具栏中的“Extrude”按钮，创建“Extrude3”对象。

2）单击“Detail View”弹出细节设置窗口。

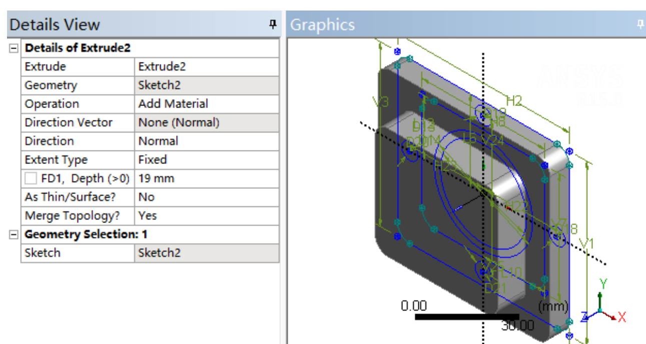


图 3-104　绘制 Extrude2

3）选择“Sketch3”对应的草图上的线，在 Detail View 中单击“Apply”按钮。

4）设置“Operation”为“Cut Material”。

5）设置“Depth”为“4mm”，单击“Generate”，得到的图形如图 3-105 所示。

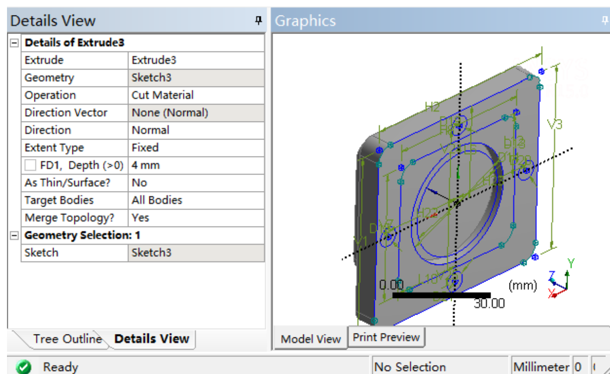


图 3-105　绘制 Extrude3

4．中心深孔

1）单击工具栏中的“Extrude”按钮，创建“Extrude4”对象。

2）单击“Detail View”弹出细节设置窗口。

3）选择“Sketch4”对应的草图上的线，在“Detail View”中单击“Apply”按钮。

4）设置“Operation”为“Cut Material”。

5）设置“Depth”为“15mm”，单击“Generate”，得到的图形如图 3–106 所示。

5．通孔

1）单击工具栏中的“Extrude”按钮，创建“Extrude5”对象。

2）单击“Detail View”弹出细节设置窗口。

3）选择“Sketch5”对应的草图上的线，在 Detail View 中单击“Apply”按钮。

4）设置“Operation”为“Cut Material”。

5）设置“Depth”为“10mm”，单击“Generate”。

6）选择“Sketch1”～“Sketch5”对象，并右击，再在弹出的快捷菜单中选择“Hide Sketch”项，得到的图形如图 3–107 所示。

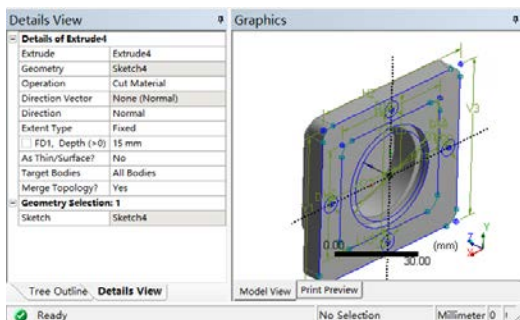


图 3–106　绘制 Extrude4

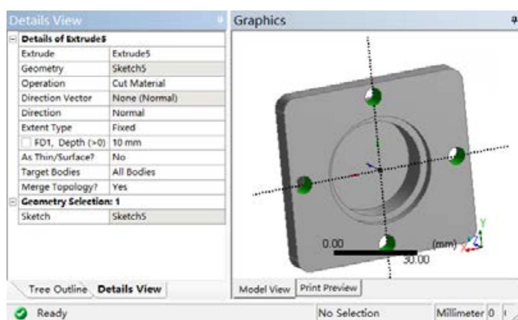


图 3–107　绘制 Extrude5 后得到的模型

6．其他特征

1）在工具栏中单击“Chamfer”按钮，选择两个孔的相邻边缘，并在细节窗口中单击“Apply”按钮。

2）设置两个尺寸均为“1mm”。

3）单击“Generate”，生成倒角，得到的图形如图 3–108 所示。

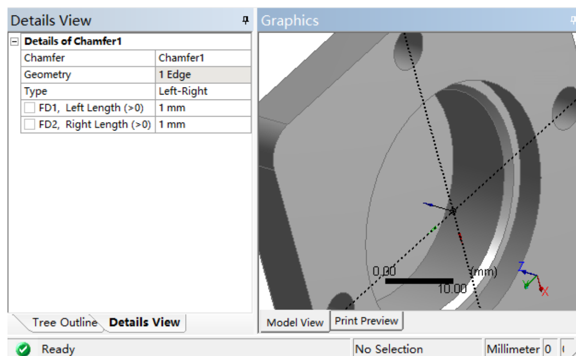


图 3–108　倒角后得到的模型

4）在工具栏中单击“Blend”按钮，并选择“Fixed Radius”。

5）在细节窗口中设置“Radius”为“3mm”。

6）选择凸起顶部的 8 条边缘，并在细节窗口中单击“Apply”按钮。

7）单击“Generate”，生成圆角，得到的图形如图 3–109 所示。

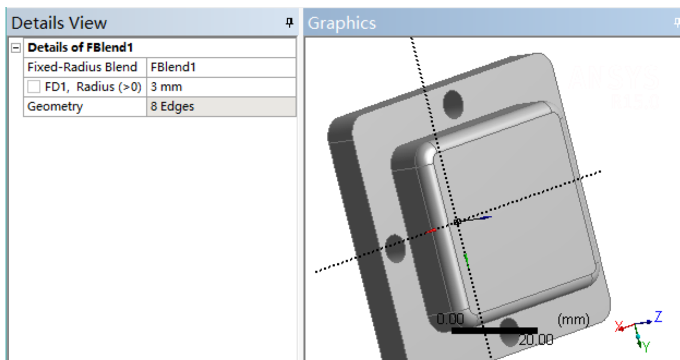


图 3–109　圆角后得到的模型

3.5.4　参数化

1．设置参数

1）选择“Extrude1”，在细节窗口中单击“Depth”前的方框，在弹出的对话框（图 3–110）中单击“OK”按钮。得到的细节窗口如图 3–111 所示。

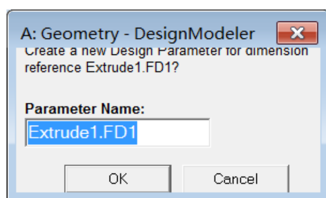


图 3–110　设置参数对话框

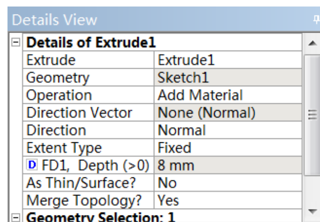
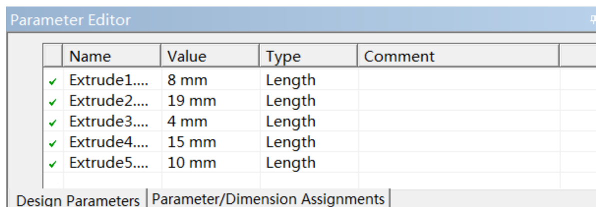


图 3–111　设置参数后的细节窗口

2）采用同样的方法，设置所有拉伸体中的 Depth 均为参数。

2．查看参数

1）单击工具栏中的“Parameters”按钮，弹出 Parameter Editor 窗口，如图 3–112 所示。图中列出了所有已选的设计参数。



Parameter Editor

	Name	Value	Type	Comment
✓	Extrude1....	8 mm	Length	
✓	Extrude2....	19 mm	Length	
✓	Extrude3....	4 mm	Length	
✓	Extrude4....	15 mm	Length	
✓	Extrude5....	10 mm	Length	

Design Parameters | Parameter/Dimension Assignments

图 3–112　所有已选参数

2）单击 Parameter Editor 窗口中的“Parameter/Dimension Assignment”标签，弹出如图 3-113 所示的窗口，从中可以看到所有已选参数的表达式。

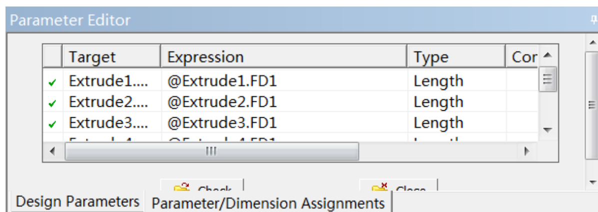


图 3-113　所有已选参数的表达式

3．参数驱动模型生成

1）将 Parameter Editor 窗口中的参数“Extrude4.FD1”修改为“20mm”，如图 3-114 所示。

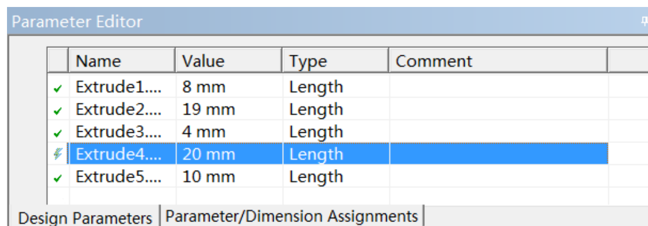


图 3-114　修改已选参数

2）单击“Generate”，生成新模型，得到的图形如图 3-115 所示。

4．完成项目

1）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮，退出 DM 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的项目如图 3-116 所示。

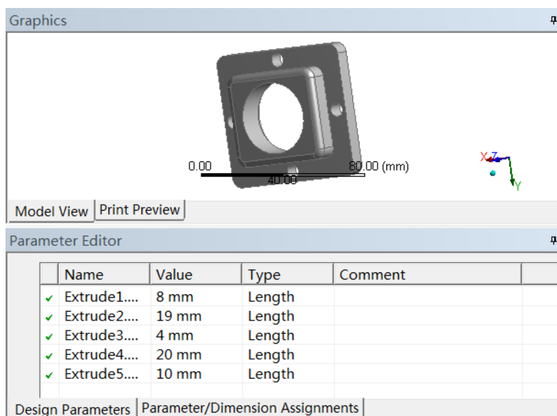


图 3-115　修改已选参数得到的模型

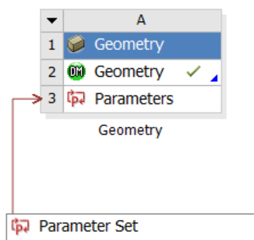


图 3-116　完成的项目

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目。

3.6 导入外部 CAD 模型

虽然大部分用户不熟悉DM的建模命令，但至少能熟练应用一种CAD建模软件，在使用ANSYS Workbench时，用户可以在自己熟悉的CAD软件系统中创建新的模型再将其导入DM中即可。

DM与当前流行的主流CAD软件均能兼容，并能与其协同建模，它不仅能读入外部CAD模型，还能嵌入主流CAD系统中，如图 3-117 和图 3-118 所示。



图 3-117 ANSYS Workbench 嵌入到 Pro/Engineer 中

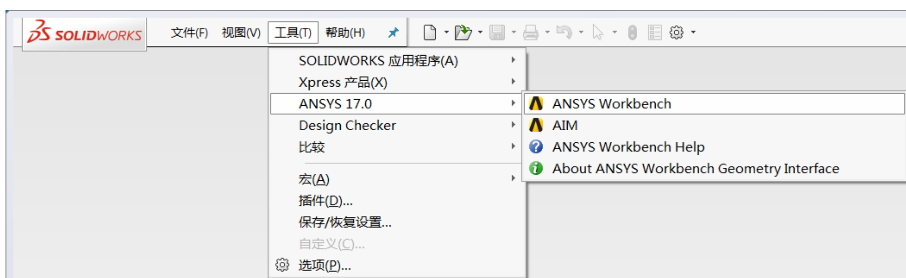


图 3-118 ANSYS Workbench 嵌入到 SolidWorks 中

3.6.1 非关联性导入文件

在DM中，选择菜单栏中的“File”（文件）→“Import External Geometry File”命令（导入外部几何体文件），即可导入外部几何体。采用该方法导入的几何体与原先的外部几何体不存在关联性。

DM 支持导入的第三方模型格式有：ACIS（SAT）、CADNexus/CATIA、IGES、Parasolid、STEP等。



DM不仅能够从外部导入几何体，同时它也能向外输出几何体模型，其命令为：“File”（文件）→“Export”（导出）。

3.6.2 关联性导入文件

在DM中建立与其他CAD建模软件的关联性，即实现二者之间的互相关联、协同建模，可以提高有限元分析的效率。这就需要将DM嵌入到主流的CAD软件系统中，若当前CAD已经打开，在DM中输入CAD模型后，它们之间将保持双向刷新功能。参数采用的默认格式为DS_XX形式。

目前DM支持协同建模的CAD软件有：Autodesk Inventor、CoCreate Modeling、Mechanical Desktop、Pro/Engineer、Solid Edge、SolidWorks、UG NX等。

3.6.3 导入定位

在DM中，CAD几何模型的导入和关联都是有基准面属性的，导入和关联时需要指定模型的参考面（方向）。在导入操作前，需要从树状视图或者平面下拉列表中选择平面作为参考面。当进行新的导入或关联功能时，激活平面为默认的基准平面。

3.6.4 创建场域几何体

在导入CAD文件时，多数情况下导入的是实体模型，在特殊情况下，可能会对实体部件周围或者所包含的区域感兴趣（如流体区域），此时可以通过对实体部件进行Taking the Negative 操作创建相应的流体区域。

通常创建场域几何体有包围（Enclosure）与填充（Fill）两种方法，这里不再赘述。

3.7 本章小结

本章介绍了在 ANSYS Workbench 中使用 DM 应用进行几何建模的操作方法，主要内容包括 DM 界面介绍、项目工程图中的 DM 操作和使用 DM 进行建模的基本操作。使用 DM 进行建模与使用其他软件进行建模的操作过程大同小异。本章介绍的内容相对有限，在使用中还应经常参考其他有关建模的书籍，以便建立的模型充分满足分析的需求。



第4章 网格划分

网格划分是 CAE 分析必不可少的步骤，网格的质量直接影响到 CAE 分析的精度、收敛性和速度。ANSYS Workbench 17.0 为网格划分提供了强大的工具，本章将介绍该工具的基本特征和网格划分控制方法。

学习目标：

- 理解网格划分的作用。
- 掌握进行网格划分的方法。

4.1 网格划分概述

ANSYS Workbench 具有强大的网格划分功能，使用这些功能进行网格划分操作可以获得高质量的网格，这对高质量的分析必不可少。

4.1.1 Workbench 中的网格划分

ANSYS Workbench 中的网格划分功能可以通过 Mechanical 或 Meshing 两个应用打开，而具体进入哪个应用则由分析需要决定。一般的分析推荐使用 Mechanical，而与流体相关的分析推荐使用 Meshing。在 ANSYS Workbench 17.0 的主界面中可以找到这两个应用的入口。

无论从 Mechanical 或 Meshing 哪个应用打开网格划分的界面，出现的界面均和如图 4-1 所示的界面大同小异。其中各部分的介绍可以参考 Mechanical 应用的介绍。

总体上看，在使用 ANSYS Workbench 进行分析时，进行网格划分的基本步骤包括以下 6 步。

1）在 ANSYS Workbench 界面的工具箱里选择合适的系统模板，如 Static Structural，双击模板或将其拖曳至项目工程图区域内，创建带网格划分功能的系统。

2）在必要的情况下，首先定义分析所需要的工程数据。如无需定义，则直接跳过该步骤。

3）导入几何模型或使用 DM 创建几何模型。

4）进入网格划分应用。例如，可以使用右击分析系统中的“Model”项，从弹出的快捷菜单中选择“Edit”，这时将打开 ANSYS Mechanical 应用。

5）进入 ANSYS Mechanical 应用后，单击树结构图中的“Mesh”选项，便进入了 Meshing 应用功能，可以设置网格划分控制。

6）设置完成后，选择“Mesh”→“Generate Mesh”命令可以进行网格划分。

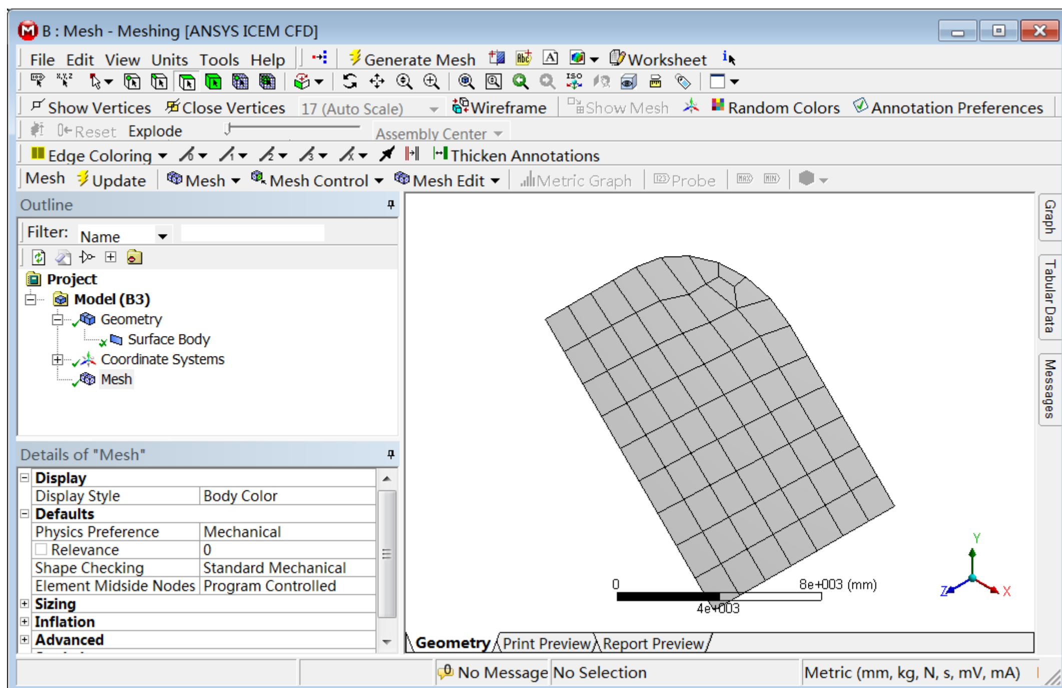


图 4-1　网格划分界面

4.1.2 网格划分算法类型

根据算法的不同，网格划分类型可以分为：协调分片算法（Patch Conforming）和独立分片算法（Patch Independent）。

1．协调分片算法

协调分片算法的分片面及边界考虑零件实体间的相互影响，采用小公差，常用于考虑几何体的小特征。该算法可以用虚拟拓扑工具把一些面或边构成组，构成虚拟单元，从而减少单元数目，简化小特征，简化载荷提取，因此如果采用虚拟拓扑工具可以放宽分片限制。

对于三维实体而言，协调分片算法主要应用于：

1）协调分片四面体划分（Patch Conforming Tetra）。

2）扫掠划分（Sweeping）。

3）六面体主导划分（Hex Dominant）。

对于面实体而言，协调分片算法主要应用于：

1）四边形主导划分（Quad Dominant）。

2）三角形划分（All Triangles）。

2．独立分片算法

独立分片算法的分片不是太严格，通常用于统一尺寸的网格。机械分析适用于协调分片算法划分，电磁分析和流体分析适合协调分片算法划分或独立分片算法划分，显式动力分析适用于独立分片算法划分或有虚拟拓扑的协调分片算法划分。

对于三维实体而言，独立分片算法主要应用于：

1）独立分片四面体划分（Patch Independent Tetra）。

2）多区划分（Multi Zone）。

3）切割和四面体算法（Cut Cell–and Tetrahedrons–algorithms）。

对于面实体而言，独立分片算法主要应用于：多区划分（Multi–Zone–Quad/Tri）。

4.2　网格划分控制

在 Mechanical 中，可以根据默认的划分设置来划分网格进行求解。但大多数情况下，还是需要设置网格划分控制选项来获得合适的网格。

4.2.1　网格划分方法

ANSYS Workbench 中常用的网格划分方法包括：四面体（Patch Conforming 和 Patch Independent）/三角形、扫掠、自动、多区、六面体主导/四边形主导。

1．四面体/三角形网格

该方法适用于任意体、快速自动生成、关键区域使用曲度和近似尺寸功能细化网格、可使用边界层膨胀细化实体边界。

但在近似网格密度下，单元和节点数高于六面体网格，由于几何和单元性能的非均质性不可能使网格在一个方向排列，不适用于薄实体或环形体。

常用参数包括：最小和最大尺寸、面和体的尺寸、Advanced 尺寸功能、增长比（Growth——对 CFD 逐渐变化，避免突变）、平滑（Smooth——有助于获得更加均匀尺寸的网格）、统计（Statistics）等。

可进行体膨胀或面膨胀：

- 体膨胀——直接选择要膨胀的面，就可使面向内径生成边界层。
- 面膨胀——选择要膨胀的面，再选择面的边，就可以向面内膨胀。

其可以采用两种方法：

- Pathch Conforming——默认考虑几何面和体生成表面网格，会考虑小的边和面。
- Patch Independent——生成体网格并映射到表面产生表面网格。

图 4–2 所示为使用四面体划分的几何模型和结果。

2．扫掠网格

扫掠网格方法要求体须是可扫掠的、膨胀可产生纯六面体或棱柱网格，手动设置源和目标面，通常一对一，薄壁模型（Src/Trg 选择“Manual–Thin”）可自动划分多个面，在厚度方向上划分多个单元。

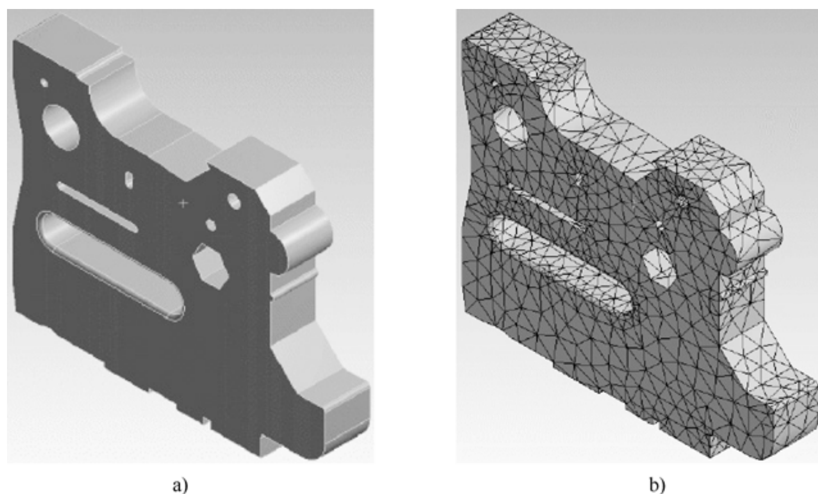

a) b)

图 4−2 四面体划分

a) 几何模型 b) 划分结果

图 4−3 所示为进行扫掠网格划分前后的对比图。

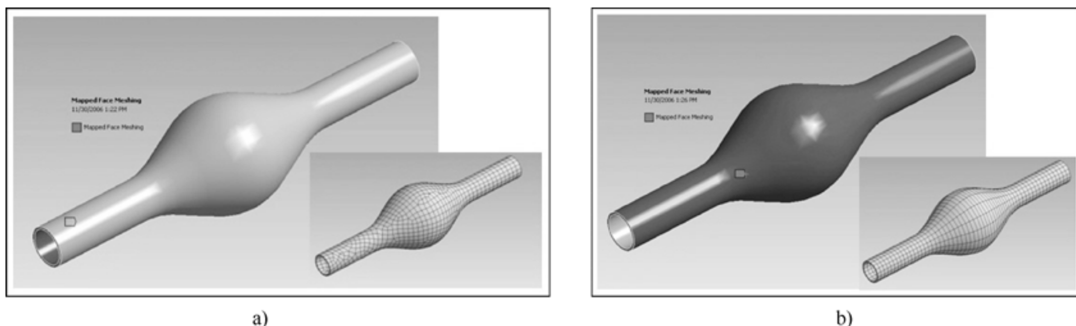

a) b)

图 4−3 进行扫掠网格划分前后的对比

a) 进行扫掠网格划分前 b) 进行了扫掠网格划分后

3．自动划分网格

程序可以自动决定几何模型是否应该划分成四面体、体是否可扫掠、同一零件的体是否有一致网格、是否可程序化控制膨胀等。

4．多区网格划分

基于 ANSYS ICEM CFD 六面体模块算法，多区划分完后，可给多区添加膨胀。多区网格划分方式同扫掠网格划分方式很相似，不同的是，在经过多区网格划分算法的处理后，其功能更加强大。图 4−4 所示为多区网格划分的示例。

5．六面体主导/四边形主导

六面体主导/四边形主导网格划分得到的网格以六面体主导/四边形主导为特征。

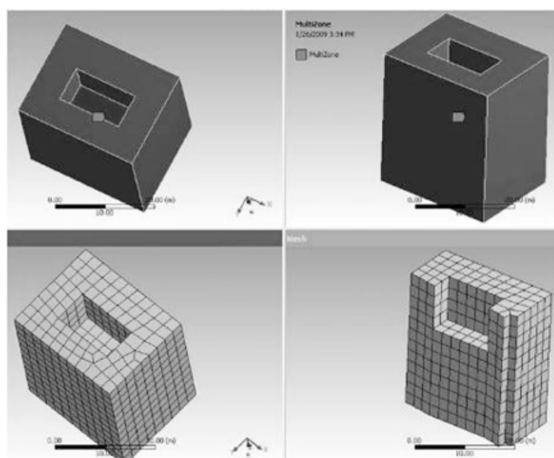


图 4-4　多区网格划分示例

4.2.2　网格划分命令

通过界面的工具栏可以直接找到网格划分命令功能按钮，见表 4-1。

表 4-1　网格划分命令说明

Mesh ▾　Mesh Con
Generate Mesh
Preview Surface Mesh
Preview Source and Ta

命令名称	命令说明
Generate Mesh	网格生成
Preview Surface Mesh	预览表面网格
Preview Sourceand Target	预览源及目标网格

4.2.3　全局网格控制

全局网格控制的各个选项见表 4-2。

表 4-2　网格划分整体控制属性设置

Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Funct...	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	10.0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse

Mesh 细节窗口项	属性说明
Defaults	默认设置
Physics Preference	选择物理环境
Relevance	网格相关度（－100～100）由疏到密
Sizing	网格尺寸控制
Use Advanced Size Function	使用高级尺寸函数（关闭）
Relevance Center	相关度中心（稀疏）
Element Size	定义平均的单元边长
Initial Size Seed	控制网格基准（根据激活装配体确定）
Smoothing	平滑度（中等）
Transition	网格过渡（快速）
Span Angle Center	跨度角中心（稀疏）

（续）

Minimum Edge Length	20.0 mm
⊟ Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
⊟ Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
⊟ Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
⊟ Advanced	
Number of CPUs for Para...	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
⊟ Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based D...	On
Defeaturing Tolerance	Default
⊟ Statistics	
Nodes	6084
Elements	800
Mesh Metric	None

Mesh 细节窗口项	属 性 说 明
Minimum Edge Length	最小单元边长
Inflation	网格膨胀控制
Use Automatic Inflation	使用自动膨胀（无）
Inflation Option	膨胀选项
Transition Ratio	过渡比（0.272）
Maximum Layers	最大层（5）
Growth Rate	生长率（1.2）
Inflation Algorithm	膨胀算法
View Advanced Options	显示高级选项（无）
Patch Conforming Options	协调分片选项
Triangle Surface Mesher	三角形划分器
Patch Independent Options	独立分片选项
Topology Checking	拓扑检查
Advanced	网格高级控制
Number of CPU s for Parallel Part Meshing	CPU 数量
Shape Checking	形状检查检验单元质量（标准结构）
Element Midside Nodes	单元是否带中间节点（程序控制）
Straight Sided Elements	网格采用直边单元（无）
Number of Retries	重试次数（默认为 4）
Extra Retries For Assembly	装配的额外重试（是）
Rigid Body Behavior	刚体行为
Mesh Morphing	是否允许网格变形（否）
Defeaturing	退化控制
Pinch Tolerance	网格收缩公差(需定义)
Generate Pinch on Refresh	网格刷新后重生成（否）
Automatic Mesh Based Defeaturing	自动退化（是）
Defeaturing Tolerance	退化公差（默认）
Statistics	网格划分统计
Nodes	网格划分的节点数
Elements	网格划分的单元数
Mesh Metric	网格检查准则

下面介绍全局网格划分控制的使用方法。

1．默认组（Defaults）

（1）物理环境（Physics Preference） 可设置为“Mechanical”“Electromagnetic”“CFD”和“Explicit”，设置分析所在的具体环境，对各个参数的影响较大，见表 4-3。

表 4-3　物理环境（Physics Preference）设置对网格控制参数默认设置的影响

参数	物理环境（Physics Preference）						
	Mechanical		Electromagnetic	CFD			Explicit
	Mechanical APDL Solver	Rigid Body Dynamics Solver		CFX-Solver	Fluent Solver	Polyflow Solver	
Relevance Center	Coarse		Medium	Coarse			Medium
Element Size	Default						
Initial Size Seed	Active Assembly						
Smoothing	Medium						High
Transition	Fast			Slow			
Span Angle Center	Coarse			Fine			Coarse
Transition Ratio	0.272			0.77	0.272		
Inflation Algorithm	Pre						
Collision Avoidance	Stair Stepping				Layer Compression	Stair Stepping	
Shape Checking	Standard Mechanical		Electromagnetics	CFD			Explicit
Element Midside Nodes	Program Controlled	Dropped	Kept	Dropped	Dropped	Dropped	Dropped
Straight Sided Elements	No	N/A	Yes	N/A	N/A	N/A	N/A
Number of Retries	4	4	4	0	0	0	4
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced						Full Mesh

（2）求解器设置（Solver Preference）　将 Physics Preference 设置为 CFD 时将出现“求解器”设置（Solver Preference）选项。可以设置为“CFX”、“Fluent”或“Polyflow”，以分别适用于这 3 种软件的分析环境。

（3）相关性（Relevance）　该项可以控制网格的细密程度，默认的控制范围为-100～100，数值越小则网格越粗糙，但求解速度也越快。

2．尺寸控制组（Sizing）

（1）使用高级尺寸功能（Use Advanced Size Function）　“使用高级尺寸功能”（Use Advanced Size Function）项提供的尺寸控制功能主要包括：

- 相邻单元的法向夹角（Curvature 类型控制）。
- 在间隙中使用的网格数量（Proximity 类型控制）。
- 根据网格的生成比率在最大和最小的尺寸间进行分类（所有类型均控制）。

可选的选项包括：

- Off——关闭。
- On:Proximity and Curvature——打开：距离和曲率类控制。
- On:Proximity——打开：距离类控制。
- On:Curvature——打开：曲率类控制。
- On:Fixed——打开：固定尺寸控制。

（2）相关中心（Relevance Center）　相关中心（Relevance Center）设置 Default 组的相关性控制工具条，可设置为“Coarse”“Medium”和“Fine”，代表的细密程度依次增大。



（3）单元尺寸（Element Size）

（4）初始尺寸植入（Initial Size Seed）　“初始尺寸植入”（Initial Size Seed）项控制每个零件初始网格尺寸的植入，选项包括：

- Active Assembly——将初始尺寸在能包围没有被抑制的零件的边界盒体的对角线上植入。
- Full Assembly——将初始尺寸在能包围所有零件的边界盒体的对角线上植入。
- Part——将初始尺寸在能包围单个零件的边界盒体的对角线上植入。

（5）平滑（Smoothing）　“平滑”（Smoothing）项通过改变节点在单元中的位置来改变单元的质量，可设置为“Low”“Medium”或“High”，三个选项得到的平滑效果依次增加。

（6）过渡（Transition）　“过渡”（Transition）项的设置影响相邻单元的生长比率，选项包括：

- 慢（Slow）——得到光滑的过渡形状。
- 快（Fast）——得到粗糙的过渡形状。

（7）跨角中心（Span Angle Center）　跨角中心（Span Angle Center）设置基于曲线的细化目标，选项包括：

- 粗糙（Coarse）—— −91°～60°。
- 适中（Medium）—— −75°～24°。
- 细密（Fine）—— −36°～12°。

（8）最小边长（Minimum Edge Length）　“最小边长”（Minimum Edge Length）项提供仅可读取的模型最小边长数值。

3．膨胀组（Inflation）

图 4-5 所示为膨胀组（Inflation）控制得到的网格划分情况，下面介绍该组内主要选项和控制功能。

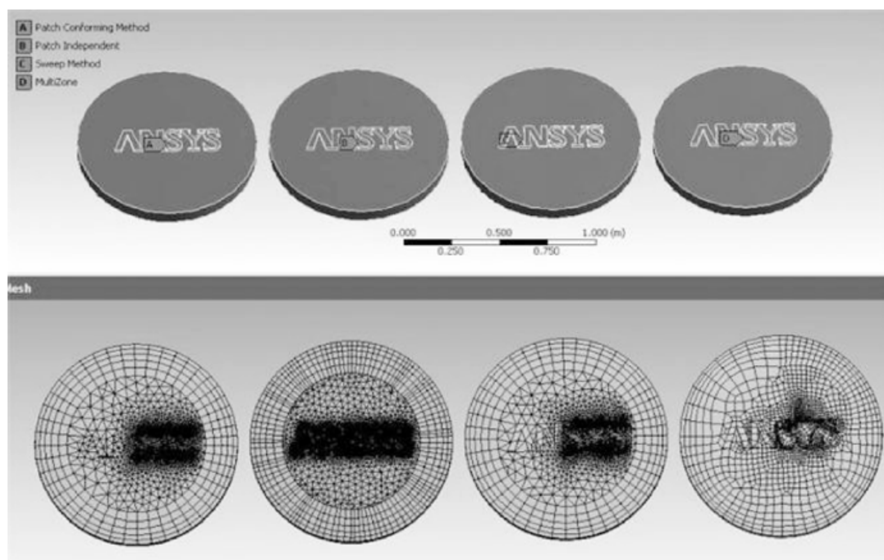


图 4-5　膨胀组控制得到的网格划分

（1）使用自动膨胀（Use Automatic Inflation） “使用自动膨胀（Use Automatic Inflation)”项可以控制膨胀边界的自动选取方式是否执行和执行方式，可设置为：

- None——不使用。
- Program Controlled——程序自动设置。
- All Faces in Chosen Named Selection——集合中的所有面。

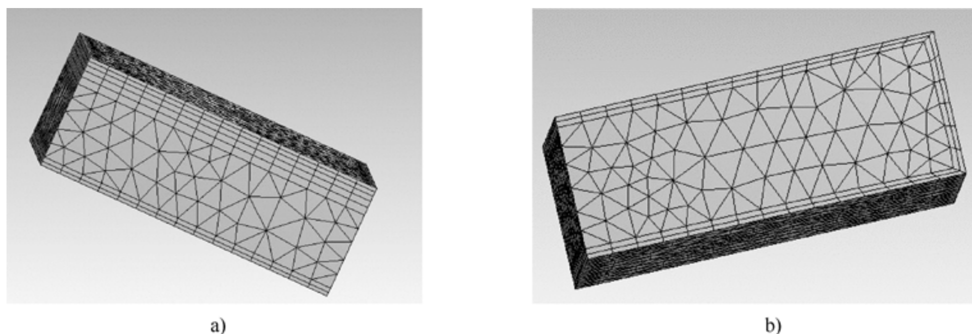
（2）膨胀选项（Inflation Option） “膨胀选项”（Inflation Option）项的设置可以确定膨胀层的高度。

（3）过渡比（Transition Ratio） “过渡比”（Transition Ratio）项控制相邻单元的生长速率。

（4）最大层（Maximum Layers） “最大层”（Maximum Layers）项决定了在网格划分过程中膨胀进行的最大层次数目，可输入范围为 1～1000。

（5）生长率（Growth Rate） “生长率”（Growth Rate）项决定了在网格划分过程中相邻膨胀层的相对厚度比，可输入范围为 0.1～5.0。

（6）膨胀算法（Inflation Algorithm） 膨胀算法（Inflation Algorithm）控制决定了在膨胀过程中使用的算法，可设置为“Pre”或“Post”。设置为“Pre”时，先膨胀设置面；设置为“Post”时，则在膨胀初步完成后继续膨胀设置面。注意，设置为“Pre”时不支持对相邻面设置为不同的膨胀层数，如图 4-6 所示。



a)　　　　　　　　　　b)

图 4-6　膨胀算法设置为“Pre”时的膨胀

a) 不相邻面可设置为不同层　b) 相邻面的膨胀层相同

4．协同分片组（Patch Conforming Options）

三角形划分器（Triangle Surface Mesher）是该组唯一设置项。该选项决定了是否采用三角形面划分方案：

- Program Controlled——程序根据需要自动确定。
- Advancing Front——在算法中采用 Advancing Front 方案，但在遇到困难时回到 Delaunay 方案。

通常而言，使用 Advancing Front 可以获得更为平滑的尺寸变化和网格形状，如图 4-7 所示。

5．独立分片组（Patch Independent Options）

拓扑检查（Topology Checking）是该组唯一设置项，其确定是否对“Patch Independent”和“Multi Zone”网格执行拓扑检查。

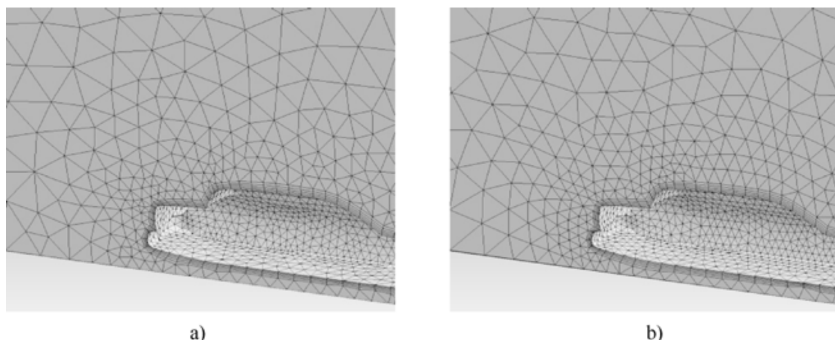


图 4-7　三角形划分器网格划分

a) Triangle Surface Mesher=Program Controlled　b) Triangle Surface Mesher=Advancing Front

6．高级控制组（Advanced）

（1）CPU 数量（Number of CPUs for Parallel Part Meshing）　该选项用来设置进行网格划分计算的 CPU 的数量。

（2）形状检查检验单元质量（Shape Checking）　形状检查检验单元质量（Shape Checking）设置单元检查的内容，可以设置为“Standard Mechanical”“Aggressive Mechanical”“Electromagnetics”“CFD”或“Explicit”。

（3）单元是否带中间节点（Element Midside Nodes）　单元是否带中间节点（Element Midside Nodes）可以用来设置网格划分时是否采用二次单元，可设置为“Dropped”或“Kept”。图 4-8 所示为设置“Dropped”或“Kept”得到的网格。

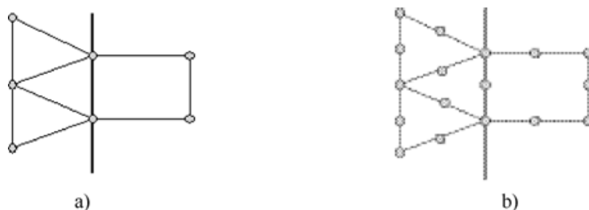


图 4-8　不带中间节点和带中间节点的单元

a) 设置为 Dropped　b) 设置为 Kept

（4）网格采用直边单元（Straight Sided Elements）　“网格采用直边单元”（Straight Sided Elements）项设置为“Yes”时表示采用直边单元，否则采用曲边单元。

7．退化组（Defeaturing）

在该组中，需要注意 Pinch 的作用。Pinch 可以在网格划分层面对微小特征进行修补来获得更好的网格划分质量，如图 4-9 所示。

8．统计组（Statistics）

（1）网格划分的节点数（Nodes） 该项提供网格划分的节点数目。

（2）网格划分的单元数（Elements） 该项提供网格划分的单元数目。

（3）网格检查准则（Mesh Metric） 常用到的项目包括：

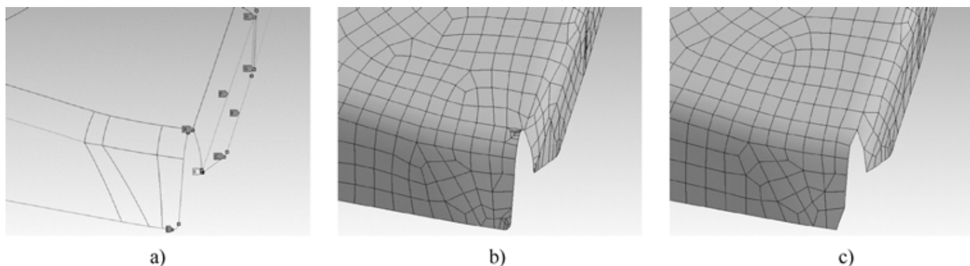


图 4-9 Pinch 控制与否时的网格划分

a) 模型 b) 不进行 Pinch 控制 c) 进行 Pinch 控制

- 单元质量（Element Quality）——除了线单元和点单元以外，基于给定单元的体积与边长的比值计算模型中的单元质量因子。范围为 0～1，1 代表完美的正方体或正方形。
- 纵横比（Aspect Ratio）——对单元的三角形或四边形顶点计算长宽比。对于小边界、弯曲形体、细薄特征和尖角等，生成的网格会有一些边长于另外一些边。理想的纵横比为 1，结构分析应<20。
- 雅克比（Jacobian Ratio）——二次单元比线性单元更能精确地匹配弯曲几何体，这样就容易在曲率大的部位产生扭曲的单元。雅克比可理解为单元的扭曲度。雅克比≤40 是可以接受的。
- 翘曲因子（Warping Factor）——对某些四边形壳体单元及六面体、棱柱、楔形体的四边形面进行计算。理想无翘曲平四边形值为 0。
- 平行偏差（Parallel Deviation）——计算四边形对边平行偏差角度。理想值为 0°，警告值为 70°。
- 最大顶角（Maximum Corner Angle）——理想三角形最大顶角为 60°，四边形最大顶角为 90°。
- 倾斜度（Skewness）。见表 4-4。

表 4-4 倾斜度

单元质量	等边	优秀	好	中等	次等	坏	退化
倾斜度	0	0～0.25	0.25～0.5°	0.5°～0.75	0.75～0.9°	0.9～1.0	1

4.2.4 局部网格控制

局部网格控制在工具栏中显示的菜单及各个功能按钮的说明见表 4-5。

表 4-5　局部网格控制

功 能 按 钮	说　　明
Method	网格划分方法
Mesh Group	网格划分群
Sizing	尺寸控制
Contact Sizing	接触尺寸控制
Refinement	网格细化
Mapped Face Meshing	映射面网格划分
Match Control	面匹配控制
Pinch	收缩控制
Inflation	膨胀控制
Sharp Angle	尖角工具
Gap Tool	空隙工具

下面对部分命令进行说明。

1．网格划分方法

详见 4.2.1 节。

2．尺寸控制（Sizing）

尺寸控制允许设置局部单元大小，采用如下方法。

- Element Size——设置单元平均边长。
- Number of Divisions——设置边缘分段数量。
- Sphere of Influence——用球体设定控制单元平均大小的范围，球体的中心坐标采用的是局部坐标系，所有包含在球域内的实体单元网格尺寸按给定尺寸划分，如图 4-10 所示。
- Body of Influence——设置网格尺寸控制的体的范围。

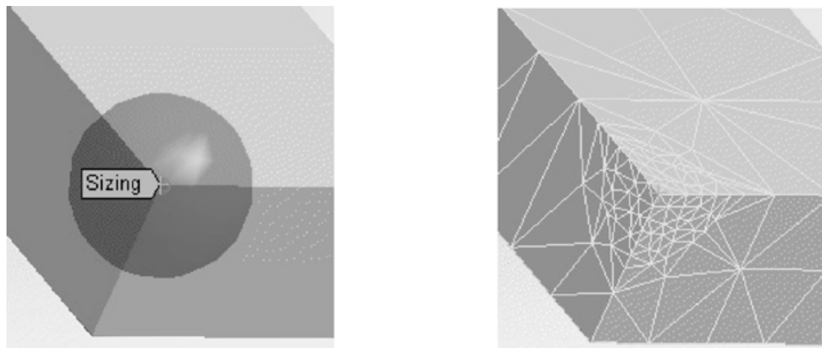


图 4-10　球体区域控制局部网格

3．接触区域网格控制（Contact Sizing）

Contact Sizing 允许在接触面上产生大小一致的单元。接触面定义了零件间的相互作用，在接触面上采用相同的网格密度对分析有利，在接触区域可以设定 Element Size 或

Relevance。

4．网格局部细化（Refinement）

Refinement 可以对已经划分的网格进行单元细化，一般而言，网格划分先进行整体和局部网格控制，然后对被选的边、面进行网格细化。

尺寸控制和细化控制的区别如下。

1）尺寸控制在划分前先给出单元的平均单元长度。通常来说，在定义的几何体上可以产生一致的网格，网格过渡平滑。

2）细化是打破原来的网格划分。如果原来的网格不一致，细化后的网格也不一致。尽管对单元的过渡进行平滑处理，但是细化仍会导致不平滑的过渡。

3）在同一个表面进行尺寸和细化定义。在网格初始划分时，首先应有尺寸控制，然后再进行第二步的细化。

5．映射面网格划分（Mapped Face Meshing）

Mapped Face Meshing 允许在面上生成规则网格。图 4−11 所示为映射面网格划分示例。

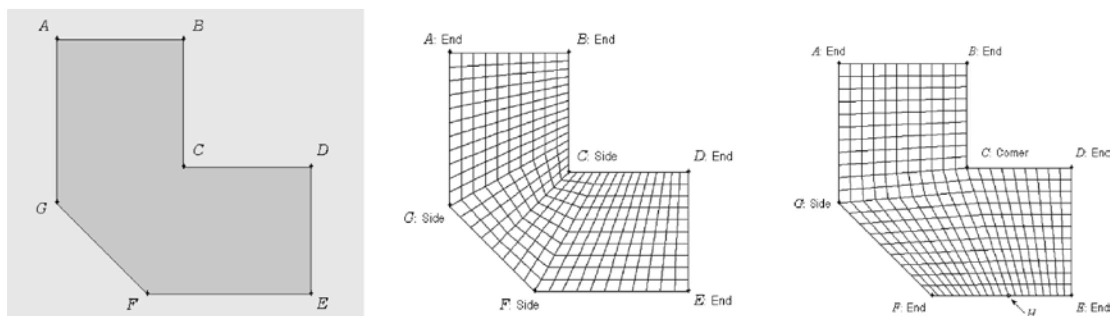
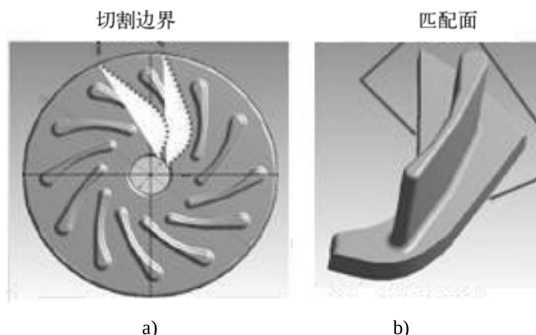


图 4−11　两种不同的映射面网格划分

6．面匹配网格划分控制（Match）

Match 用于在对称面上划分一致的网格，尤其适用于旋转机械的旋转对称分析。因为旋转对称所使用的约束方程其连接的截面上节点的位置除偏移外必须一致，如图 4−12 所示。



a)　　b)

图 4−12　旋转对称模型面匹配网格划分控制

a) 整体模型　b) 循环对称模型

4.2.5 虚拟拓扑工具

虚拟拓扑（Virtual Topology）允许为了更好地进行网格划分合并面或分解面、合并边缘或分解边缘等。

虚拟单元（Virtual Cell）就是将虚拟拓扑操作的结果进行存储的介质。使用虚拟单元来取代原来的几何构型，在网格划分的时候直接在虚拟单元上操作，以期获得更好的网格划分结果。图 4-13 所示为进行面合并的虚拟拓扑操作的过程。

虚拟单元通常用于删除小特征，从而在特定的面上减小单元密度，或删除有问题几何体，如长缝或小面，从而避免网格划分失败。但是要注意虚拟单元改变了原有的拓扑模型，因此内部的特征如果有加载、支撑、求解等将不再被考虑。

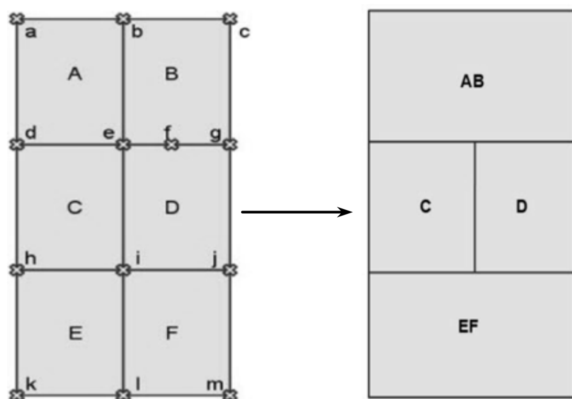


图 4-13 面合并的虚拟拓扑操作

4.3 网格划分示例

通过上面几节的学习，已经基本掌握了网格划分的方法，本节将通过示例的方法来加强对网格划分的方法及思路的掌握，并从中了解各网格参数的设置技巧。

本节对网格划分的操作进行示例。

4.3.1 自动网格划分案例

1．启动 Workbench 并建立网格划分项目

步骤 01 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

步骤 02 在 ANSYS Workbench 主界面中选择“Units”（单位）→“Metric (tone,mm,s,℃,mA,N,mV)”命令，设置模型单位，如图 4-14 所示。

步骤 03 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的“Component Systems”→“Mesh”（网格）选项，即可在项目管理区创建分析项目 A。

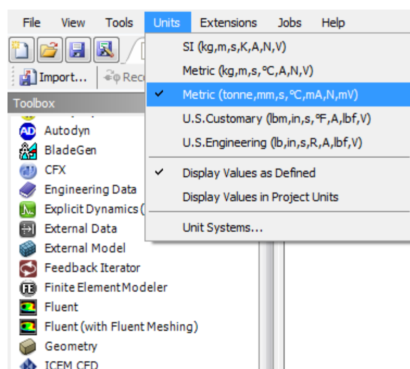


图 4-14　设置模型单位

2．导入创建几何体

步骤 01　在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”命令，如图 4-15 所示，此时会弹出“打开”对话框。

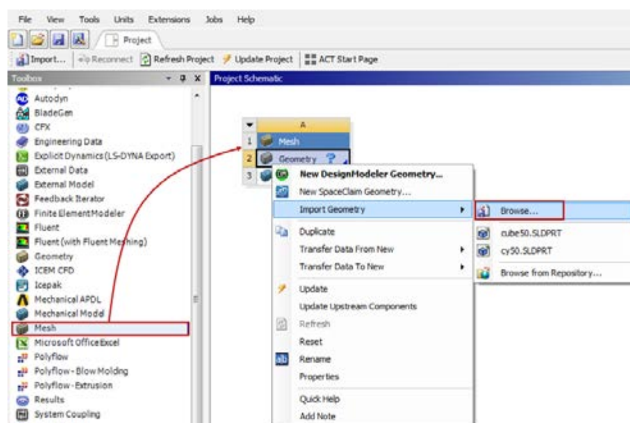


图 4-15　导入几何体

步骤 02　在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“char03-01”几何体文件，如图 4-16 所示，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，如图 4-17 所示，表示实体模型已经存在。

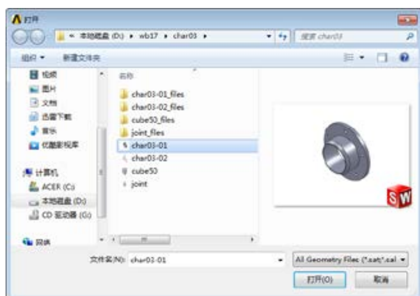


图 4-16　“打开”对话框

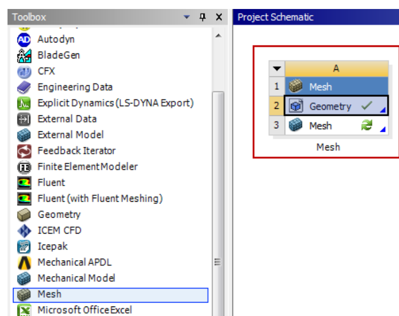


图 4-17　模型已存在的项目

步骤 03　双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，此时会进入到 DM 界面，设计树中“Import1”前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 4-18 所示。

步骤 04　单击 ⚡Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 4-19 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

步骤 05　单击 DM 界面右上角的 “关闭”按钮 ✕，退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

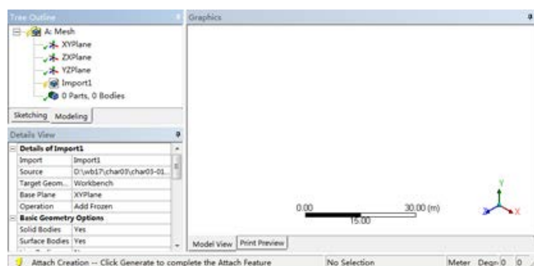


图 4-18　生成前的 DM 界面

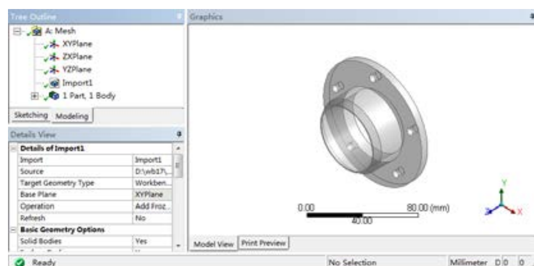


图 4-19　生成后的 DM 界面

3．对模型进行网格划分

步骤 01　双击项目 A 中的 A3 栏“Mesh”项，进入如图 4-20 所示的 Meshing 界面，在该界面下即可进行网格的划分操作。

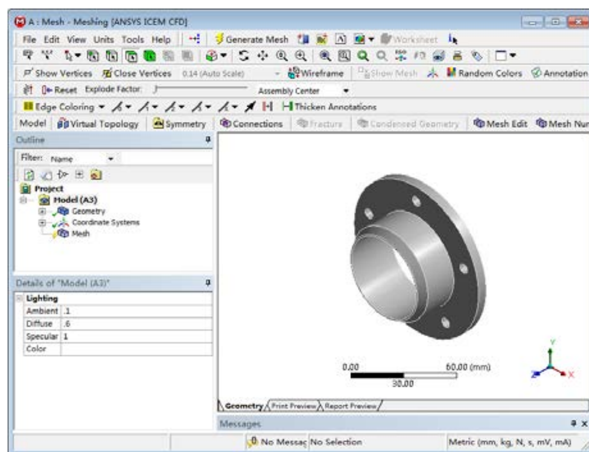


图 4-20　Meshing 界面

步骤 02　选中 Meshing 界面左侧中的“Mesh”选项，在参数设置列表中的“Physics Preference”下设置物理类型为“Mechanical”，如图 4-21 所示。

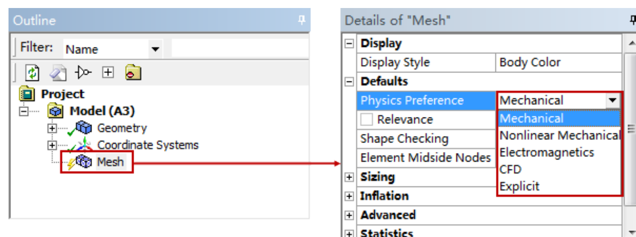


图 4-21　设置分析类型

步骤03 选中“Mesh”项，选择 Mesh 工具栏中的“Mesh Control”（网格控制）→“Method”（方法）命令，此时会在设计树中添加“Automatic Method”项，如图 4-22 所示。

步骤04 单击图形工具栏中的选择模式下的“Single Select”（点选）按钮，然后单击“选择体”按钮，如图 4-23 所示。

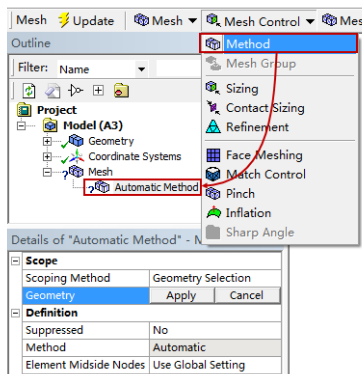


图 4-22 添加网格控制

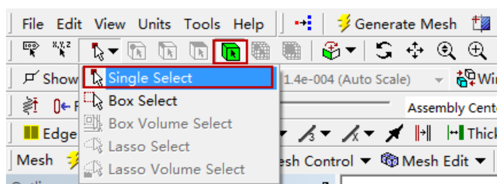


图 4-23 图形工具栏

步骤05 在图形窗口中选择零件体，在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成体的选择。

步骤06 在“Mesh”项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，如图 4-24 所示。此时会弹出网格划分进度条，进度条消失后会生成如图 4-25 所示的网格。

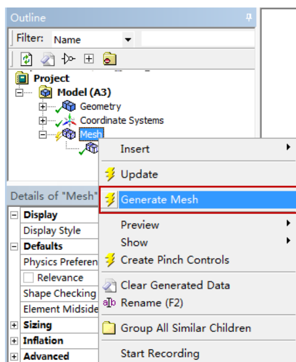


图 4-24 快捷菜单

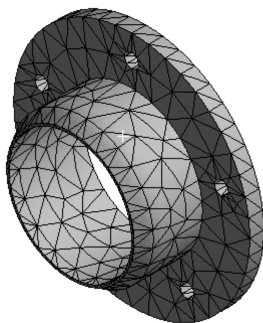


图 4-25 网格效果

4．保存文件并退出

步骤01 单击 Meshing 界面右上角的“关闭”按钮退出 Meshing 界面，并返回到 Workbench 主界面。

步骤02 在 Workbench 主界面中单击“常用”工具栏中的“保存”按钮，保存刚刚创建的模型文件。

步骤03 单击 Workbench 主界面右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench，完成模型的网格划分。

4.3.2 网格划分控制案例

1. 启动 Workbench 并建立网格划分项目

步骤 01 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

步骤 02 在 ANSYS Workbench 主界面中选择“Units”（单位）→“Metric（kg,m,s,℃,A,N,V）”命令，设置模型单位。

步骤 03 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的“Component Systems”→“Mesh”（网格）选项，在项目管理区创建分析项目 A。

2. 导入创建几何体

步骤 01 在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”命令，如图 4-26 所示，此时会弹出“打开”对话框。

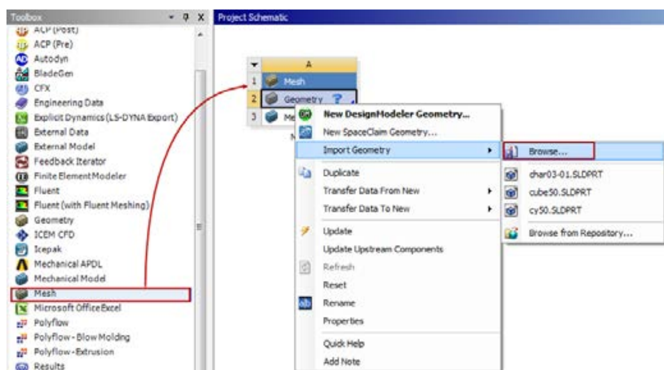


图 4-26　导入几何体

步骤 02 在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“char03-02”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，如图 4-27 所示，表示实体模型已经存在。

步骤 03 双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，此时会进入到 DM 界面，设计树中“Import1”前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示。

步骤 04 单击“Generate”（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 4-28 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

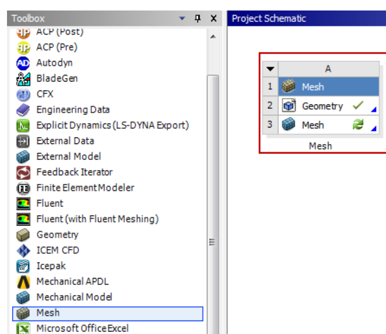


图 4-27　模型已存在的项目

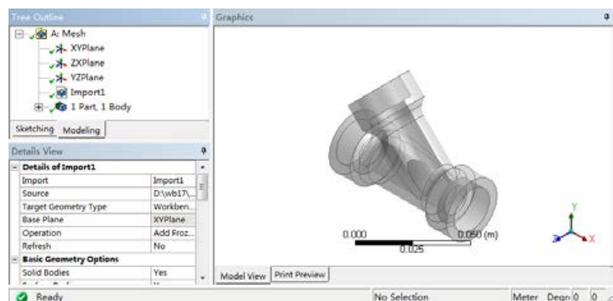


图 4-28　生成几何体后的 DM 界面

步骤05 单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮，退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

3．设置网格划分选项及默认网格显示

步骤01 双击项目 A 中的 A3 栏“Mesh”项，进入如图 4-29 所示的 Meshing 界面，在该界面下即可进行网格的划分操作。使用菜单“Mesh Control”→“Method”命令插入网格。

步骤02 在目录树中单击“Mesh”，在界面下侧的 Details of “Mesh” 面板中设置“Physics Preference”为“Mechanical”，如图 4-30 上部所示。

步骤03 在目录树中单击“Automatic Method”，在界面下侧的 Details of “Automatic Method” -Method 面板中设置“Mesh Method”为“Tetrahedrons”，如图 4-30 下部所示。

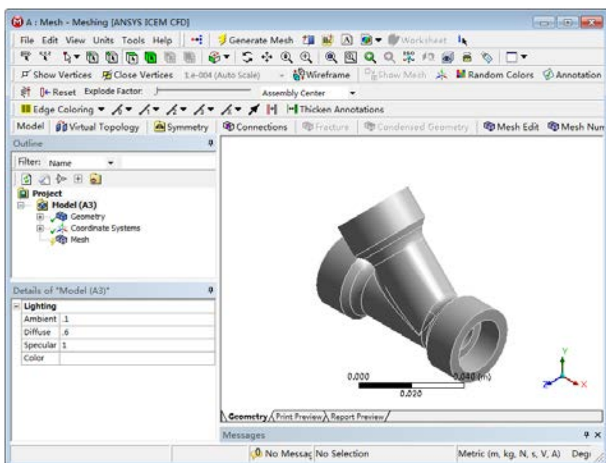


图 4-29　Meshing 界面

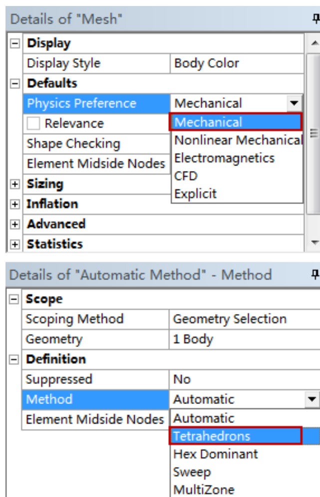


图 4-30　Meshing Options 面板

步骤04 在“Mesh”项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，如图 4-31 所示。当弹出的网格划分进度条消失后会生成如图 4-32 所示的网格。

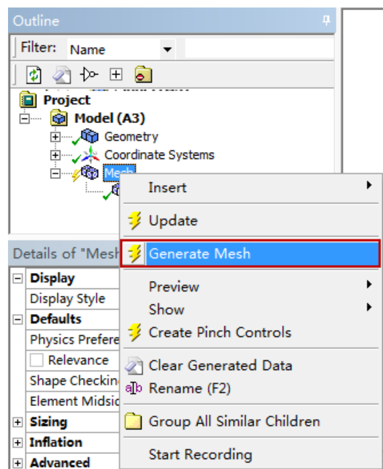


图 4-31　Mesh 快捷菜单

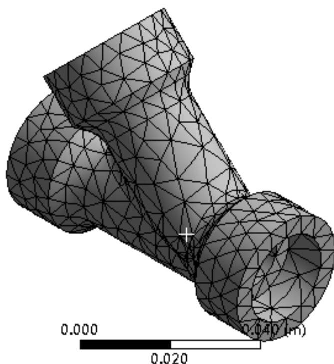


图 4-32　网格效果

步骤05 单击“Mesh”选项，在参数设置列表中展开“Sizing”和“Statistics”项。在“Mesh Metric”中选择“Skewness”，可以观察到网格划分后的状态（包括网格的粗糙度和网格统计），如图 4-33 所示。

4．CFD 网格划分显示

步骤01 在参数设置列表中将“Physics Preference”改为“CFD”，“Solver Preference”改为“Fluent”，检验高级尺寸选项设置为“Curvature”。

步骤02 在分析树中的“Mesh”项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令。当弹出的网格划分进度条消失后参数设置列表如图 4-34 所示，生成的网格如图 4-35 所示。

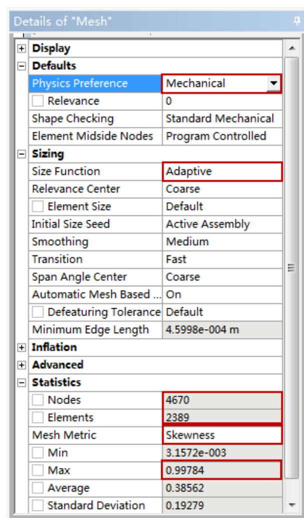


图 4-33　Mechanical 网格划分状态

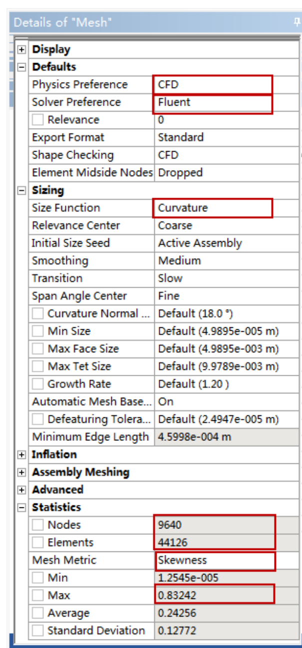


图 4-34　CFD 网格划分状态

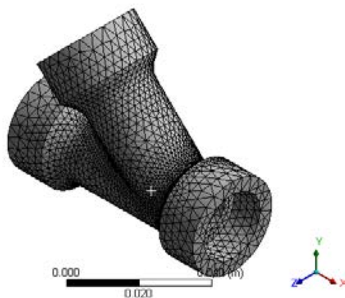


图 4-35　网格效果

5．最大、最小尺寸控制

步骤01 在图形窗口中，右击，在弹出的快捷菜单中选择“View”→“Top”命令，如图 4-36 所示，此时的视图如图 4-37 所示。

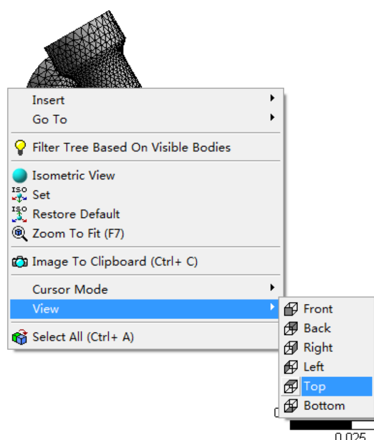


图 4-36 快捷菜单

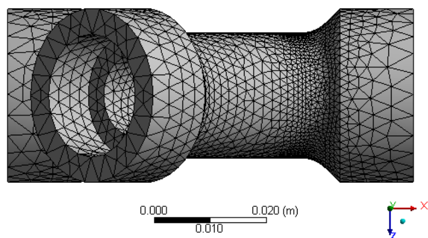


图 4-37 调整后的视图效果

步骤02 单击“标准”工具栏中的“剖切视图”按钮 ，如图 4-38 所示，在图形窗口中绘制一条直线，将图形剖开，如图 4-39 所示。

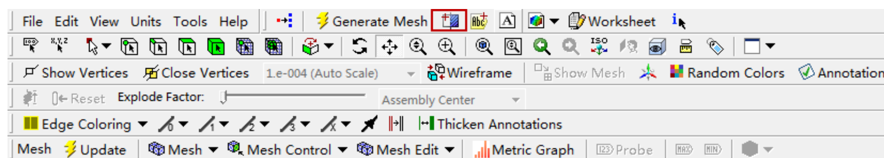


图 4-38 “标准”工具栏

步骤03 选择快捷菜单中的“Back”命令，或按住鼠标中键，调整视图显示，以便观察剖切面的网格划分效果，如图 4-40 所示。

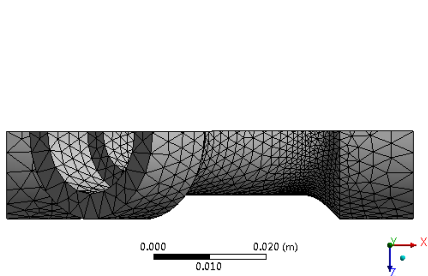


图 4-39 剖切效果

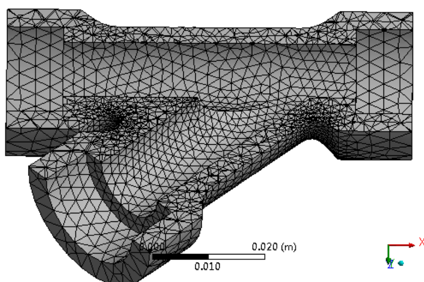
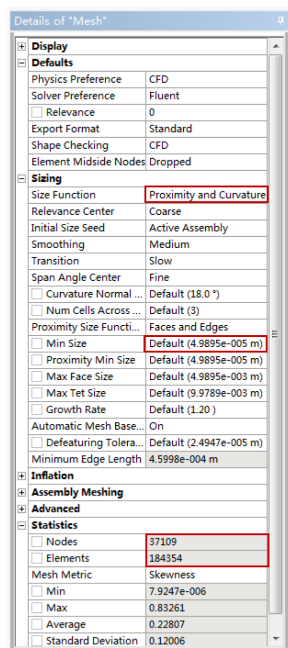


图 4-40 调整视图显示

步骤04 在参数设置列表中的“Size Function”内改变设置为“Proximity and Curvature”，为网格划分算法添加更好的处理临近部位的网格，如图 4-41 所示。

步骤05 保留剖切截面激活状态的视图，再次执行“Generate Mesh”命令生成网格，此时在厚度方向增加了多个单元并且网格数量大大增加，网格效果如图 4-42 所示。

步骤06 在“Min Size”中输入“5.e-004m”，如图 4-43 所示，执行“Generate Mesh”命令生成网格，网格效果如图 4-44 所示。此时厚度方向仍然有多个单元但网格数量相对较少。



Details of "Mesh"

Display	
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Export Format	Standard
Shape Checking	CFD
Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal ...	Default (18.0 °)
Num Cells Across ...	Default (3)
Proximity Size Functi...	Faces and Edges
Min Size	Default (4.9895e-005 m)
Proximity Min Size	Default (4.9895e-005 m)
Max Face Size	Default (4.9895e-003 m)
Max Tet Size	Default (9.9789e-003 m)
Growth Rate	Default (1.20)
Automatic Mesh Base...	On
Defeaturing Tolera...	Default (2.4947e-005 m)
Minimum Edge Length	4.5998e-004 m
Inflation	
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
Nodes	37109
Elements	184354
Mesh Metric	Skewness
Min	7.9247e-006
Max	0.83261
Average	0.22807
Standard Deviation	0.12006

图 4-41　网格状态（一）

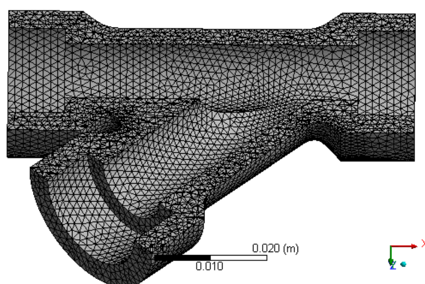
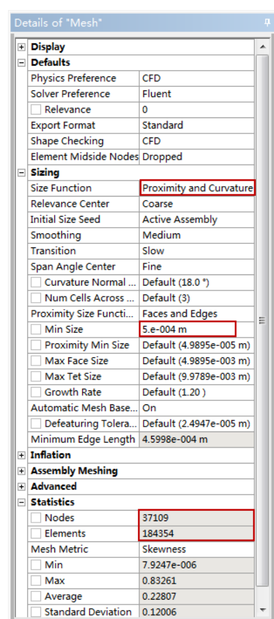


图 4-42　网格效果（一）



Details of "Mesh"

Display	
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Export Format	Standard
Shape Checking	CFD
Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal ...	Default (18.0 °)
Num Cells Across ...	Default (3)
Proximity Size Functi...	Faces and Edges
Min Size	5.e-004 m
Proximity Min Size	Default (4.9895e-005 m)
Max Face Size	Default (4.9895e-003 m)
Max Tet Size	Default (9.9789e-003 m)
Growth Rate	Default (1.20)
Automatic Mesh Base...	On
Defeaturing Tolera...	Default (2.4947e-005 m)
Minimum Edge Length	4.5998e-004 m
Inflation	
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
Nodes	37109
Elements	184354
Mesh Metric	Skewness
Min	7.9247e-006
Max	0.83261
Average	0.22807
Standard Deviation	0.12006

图 4-43　网格状态（二）

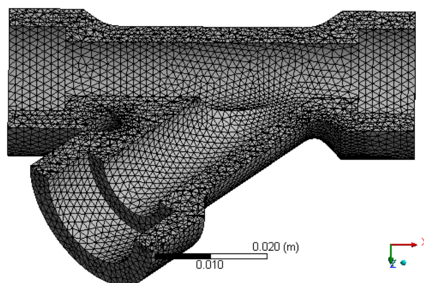


图 4-44　网格效果（二）

6．使用面尺寸

步骤 01　在“Section Planes”列表中取消勾选“剖切截面”复选框，如图 4-45 所示。在参数设置列表中设置“Size Function”为“Curvature”，其余各项保持默认，如图 4-46 所示。

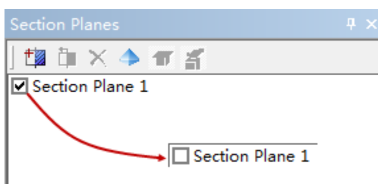


图 4–45　关闭剖切截面显示

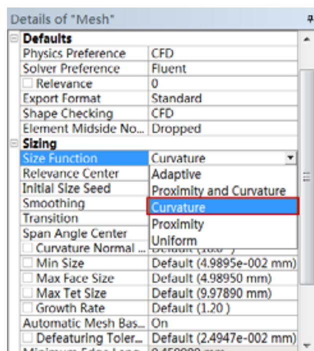


图 4–46　参数设置列表

步骤 02　选中分析树中的“Mesh”项，选择 Mesh 工具栏中的“Mesh Control”（网格控制）→“Sizing”（尺寸）命令，为网格划分添加尺寸控制，如图 4–47 所示，此时会在分析树中出现“Sizing”项。

步骤 03　单击图形工具栏中选择模式下的 Single Select “Single Select”（点选）按钮，然后单击“选择面”按钮，单击选择如图 4–48 所示的面。

步骤 04　在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成面的选择，设置“Element Size”为“2.e-003m”，如图 4–49 所示。

步骤 05　执行“Generate Mesh”命令生成网格，此时所选面的网格比邻近面的网格要细，如图 4–50 所示。

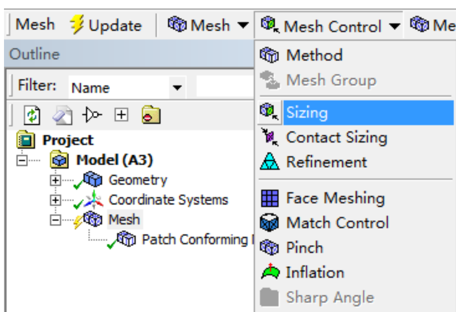


图 4–47　添加尺寸控制

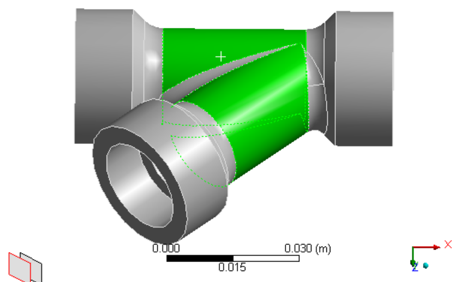


图 4–48　选择面

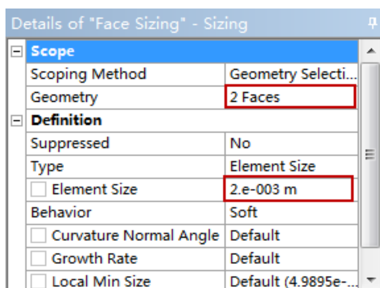


图 4–49　参数设置列表

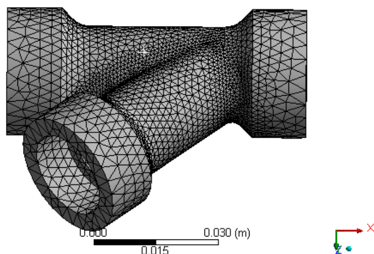


图 4–50　网格效果

7．影响球尺寸

步骤 01 在分析树中的“Coordinate Systems”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Coordinate System”命令，在模型中插入一个坐标系，如图 4-51 所示。

步骤 02 在参数设置列表中将“Define By”选项设置为“Global Coordinates”，在“Origin X”“Origin Y”和“Origin Z”中分别输入“4.e-002”“2.5e-002”“0”，如图 4-52 所示。

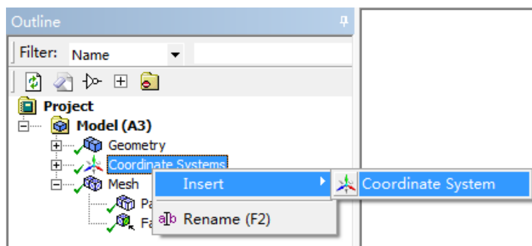


图 4-51 快捷菜单

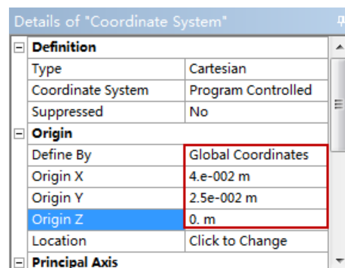
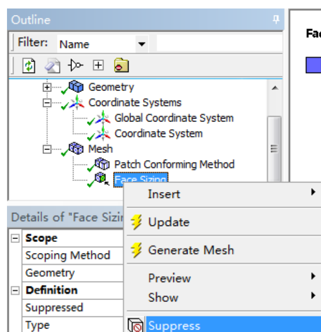


图 4-52 参数设置列表

步骤 03 在分析树中的“Face Sizing”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Suppress”命令，如图 4-53 所示，此时网格划分中的面尺寸被抑制，如图 4-54 所示，被抑制的选项前图标由变为。



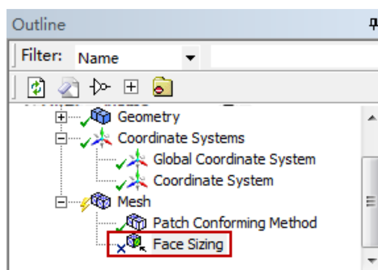


图 4-53 快捷菜单　　图 4-54 抑制面尺寸

步骤 04 选中分析树中的“Mesh”项，选择“Mesh”工具栏中的“Mesh Control”（网格控制）→“Sizing”（尺寸）命令，为网格划分添加尺寸控制，此时会在分析树中出现“Sizing”项，如图 4-55 所示。

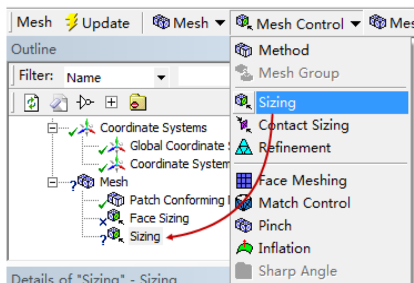
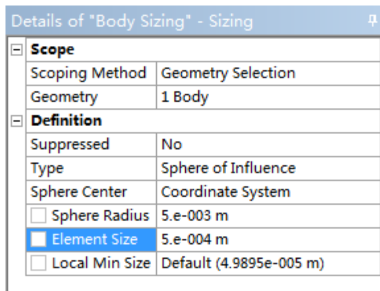


图 4-55 添加尺寸控制

步骤05 单击图形工具栏中选择模式下的“Single Select”（单选）按钮，然后单击“选择体”按钮，选择体。

步骤06 在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成体的选择，设置“Type”为“Sphere of Influence”，设置“Sphere Center”为刚刚创建的坐标系，设置“Sphere Radius”为“5.e-003”，“Element Size”为“5.e-004”，如图 4-56 所示，显示的模型会自动更新，以方便预览影响球的范围，如图 4-57 所示。



Details of "Body Sizing" - Sizing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Sphere of Influence
Sphere Center	Coordinate System
Sphere Radius	5.e-003 m
Element Size	5.e-004 m
Local Min Size	Default (4.9895e-005 m)

图 4-56　参数设置

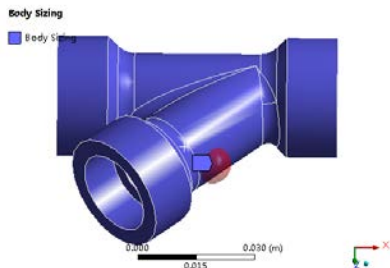


图 4-57　影响球

步骤07 执行“Generate Mesh”命令生成网格，如图 4-58 所示，此时所选影响球范围邻近面的网格更细。在“Section Planes”列表中选中复选框将剖切截面显示打开，此时的网格效果如图 4-59 所示。

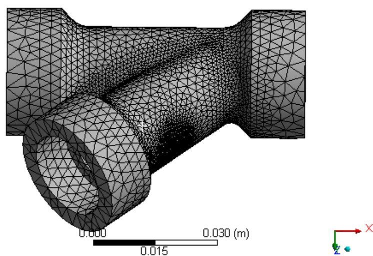


图 4-58　网格效果

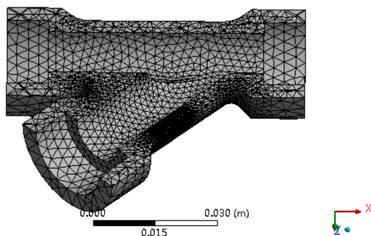


图 4-59　剖切效果

8．保存文件并退出

步骤01 单击 Meshing 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Meshing 界面，并返回到 Workbench 主界面。

步骤02 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 “保存”按钮，保存刚刚创建的模型文件。

步骤03 单击 Workbench 主界面右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench，完成模型的网格划分。

4.4　CAD 模型划分示例

本节对 CAD 模型的网格划分处理进行示例。

1．创建项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS

17.0”→“Workbench 17.0”选项，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Component Systems”→“Mesh”选项，在项目工程图区域内创建项目 A，如图 4-60 所示。

2．添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框，如图 4-61 所示。

2）在弹出的对话框中选择文件路径，导入“chap04-2”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 变为 ，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面。此时如果设计树中显示 ，表示需要生成模型，可进行步骤 4)，否则可直接进入步骤 5)。

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

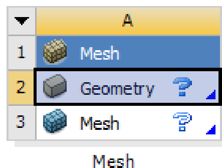


图 4-60　创建项目

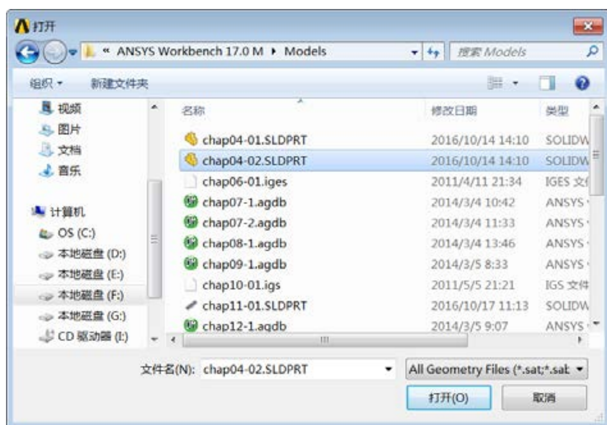


图 4-61　“打开”对话框

3．网格划分

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Mesh”项，进入 Mechanical 界面。

2）在树结构图中单击“Mesh”。

3）设置细节窗口中的“Relevance”为“10”。

4）单击“Generate”，生成的网格模型如图 4-62 所示。

5）查看细节窗口中的“Statistics”项，可以看到“Nodes”为“86094”，“Element”为“13860”。

6）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

7）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮。

8）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成该项目。

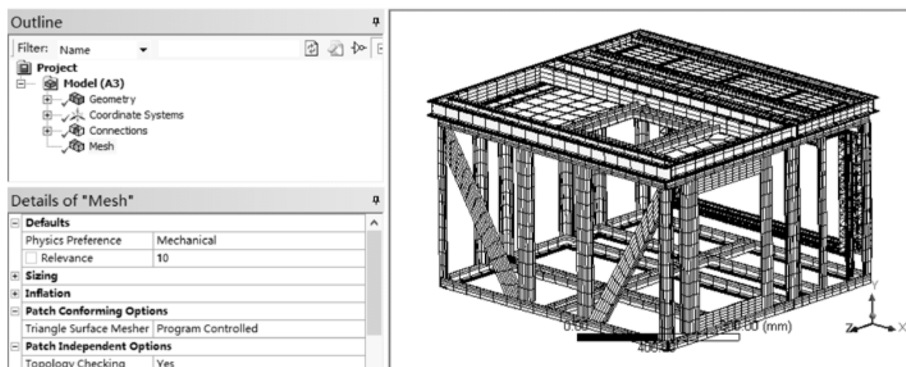


图 4-62　直接生成网格模型

4.5　本章小结

本章介绍了使用 ANSYS Workbench 17.0 进行网格划分的基础内容，包括 Meshing 应用在网格划分中的作用和网格划分控制的有关内容，重点叙述了全局网格划分控制和局部网格划分控制的常见选项设置。本章中提及的内容，可以满足用户使用 Workbench 进行网格划分的一般要求，但涉及复杂的零部件的网格划分时还应多参考帮助文档和有关书籍。

第 5 章　Mechanical 介绍

Mechanical 应用是 ANSYS Workbench 的重要组成部分，其可进行一般的结构分析，包括力学分析、热分析和电磁分析等。学好 Mechanical 意味着在一定程度上掌握了 ANSYS Workbench。本章介绍 Mechanical 应用的一些基本内容，包括界面、分析过程和分析类型等。

学习目标：

➢ 熟悉 Mechanical 应用的界面。

➢ 理解在 Mechanical 应用中进行分析的步骤。

5.1　Mechanical 基础

本节介绍 Mechanical 界面和分析过程及分析类型的概括，通过本节的学习应能对 Mechanical 有基础的理解，以进一步学习本书其他部分的内容。

5.1.1　Mechanical 界面

1．界面简介

Mechanical 界面包括的功能单元见表 5−1。

表 5−1　Mechanical 界面功能单元

功 能 单 元	描　　述
主菜单	该菜单包括通用菜单，如 File、Edit 等
标准工具栏	该工具栏包含常用的应用命令
图形工具栏	该工具栏对图形浏览窗口进行控制
快捷菜单	该菜单在单击右键时得到，其内容取决于用户在树结构图中单击的内容
单位转换工具栏	默认不可见，可以用来转换单位
集合工具栏	默认不可见，可以用来管理集合
图形选项工具栏	提供了通用的图形控制工具
边缘图形选项	提供了图形边缘的显示控制工具
树结构图	树结构图表现了分析项目的框架结构。在树结构图的不同位置右击，可以获得对当前位置进行支持的快捷菜单
细节窗口	显示对应树结构图中项目的细节情况
几何窗口	显示和操作树结构图中内容的图像，可显示： ➢ 三维几何模型 ➢ 二维/三维图形 ➢ Spreadsheet 数据表 ➢ HTML 页
参考帮助	打开高亮对象的对象参考帮助页
状态条	反馈当前状态
标签栏	应用窗口拥有 3 个标签栏

2．界面管理

1）可以通过单击各个部分的■或■按钮来实现面板的浮动和固定。

2）可以通过拖曳的方式来重新安排各个部分的位置。

3）可以通过 View→Windows 菜单的“Rest Layout”命令来恢复界面的初始布置。

3．主界面

（1）树结构图（Tree Outline） 图 5-1 所示是一个典型的树结构图。该图反映了分析项目的逻辑结构和执行顺序。其中带有⊞的项目可以进一步展开。

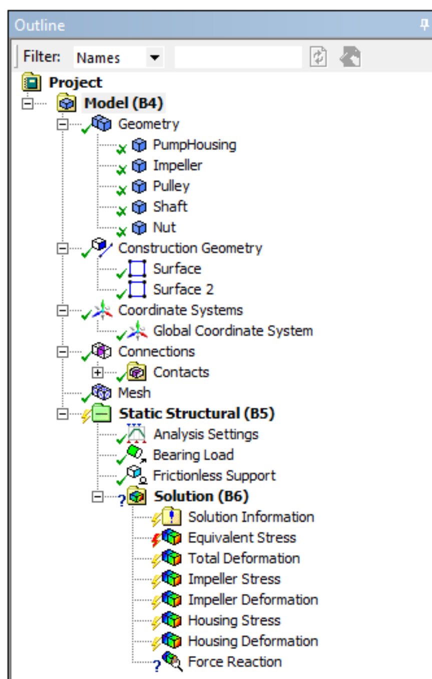


图 5-1　树结构图 Tree Outline

树结构图中的图标后面的部分为数据的表达样式，而前面部分图标为各个数据的状态显示，见表 5-2。

表 5-2　状态图标

状态图标名称	图　标	示 例 说 明
Underdefined	Pressure	未定义，所加载荷的幅值不能为 0
Error	Thermal Condition	错误，载荷出错
Mapped Faceor Match Control Failure	Mapped Face Meshing	失败，映射划分失败
OK	Fixed Support	操作成功
Needstobe Updated	Result Object	等待求解
Hidden	Rec_Bar	隐藏的实体
Meshed	Solid	实体已被划分网格
Suppress	Beam	被抑制的项目

（续）

状态图标名称	图　标	示 例 说 明
Solve	Result Object	黄色闪电状——未被求解的结果项 绿色闪电状——正在求解的结果项 绿色勾状——求解完成的结果项 红色闪电状——求解失败的结果项 绿色向下箭头——完成背景求解可用于下载 红色向下箭头——背景求解失败

在树结构图的顶部有过滤工具栏，如图 5-2 所示。这些工具的过滤功能见表 5-3，通过这些工具可以批量地找到所需的项目进行操作。

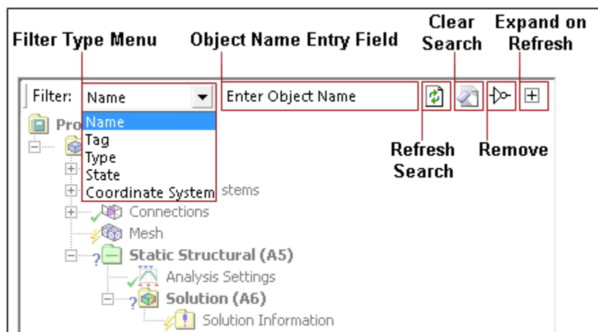


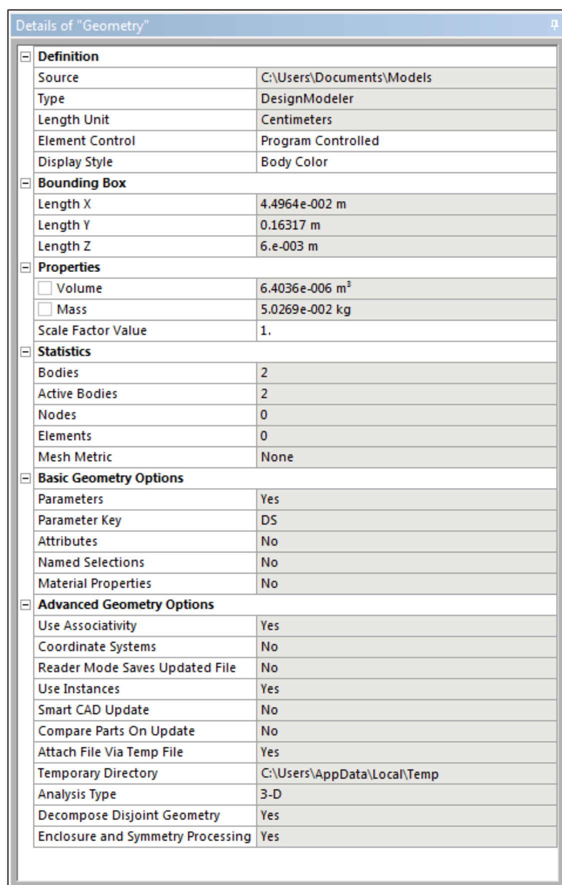
图 5-2　过滤工具栏

表 5-3　过滤功能

过 滤 类 型	描　述
Name	根据名称对树结构图进行过滤
Tag	根据标签名称进行过滤
Type	提供一个下拉菜单，提供下列选项： ➢ All——显示所有树结构图项 ➢ Results——结果项 ➢ Boundary Conditions——边界条件项 ➢ Connections——连接项 ➢ Commands——APDL命令项
State	提供一个下拉菜单来选择状态过滤，包括以下选项： ➢ All states——所有状态 ➢ Suppressed——抑制状态 ➢ Not Licensed——未许可状态 ➢ Under defined——未定义状态
Coordinate System	提供下拉菜单显示树结构图中所有的坐标系

（2）细节窗口（Details View） 图 5-3 所示为一个典型的细节窗口。注意到部分参数前面带有方框，在选中这些方框后可以将对应的参数设置为分析变量。

（3）几何图形窗口（Geometry Window） 位于界面的主要部分，在该部分的底部有三个选项卡，Geometry Window 对应第一个选项卡。提供几何图形相关的显示。


Details of "Geometry"

Definition	
Source	C:\Users\Documents\Models
Type	DesignModeler
Length Unit	Centimeters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	4.4964e-002 m
Length Y	0.16317 m
Length Z	6.e-003 m
Properties	
Volume	6.4036e-006 m³
Mass	5.0269e-002 kg
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Bodies	2
Active Bodies	2
Nodes	0
Elements	0
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

图 5-3　细节窗口

（4）打印预览（Print Preview）　位于界面的主要部分，在该部分的底部有三个选项卡，Print Preview 对应第二个选项卡。提供几何图形窗口中的图形打印预览。

（5）报告预览（Report Preview）　位于界面的主要部分，在该部分的底部有三个选项卡，Report Preview 对应第三个选项卡。提供分析项目生成报告的预览。

4．相关信息窗口（Contextual Windows）

相关信息窗口对实时操作非常重要，一般可以通过选择“View”→“Windows”下的菜单项得到。相关介绍如下文所述。

（1）选取信息窗口（Selection Information Window）　选取信息窗口提供了显示模型上已选取项目的相关信息的快捷方式。其可以通过选择“View”→“Windows”→“Selection Information”来显示。如图 5-4 所示显示了已选取顶点的信息。

相关信息窗口控制功能区提供了方便的信息控制功能，包括坐标系选取（Coordinate System Selection）、选取信息列控制（Selection Information Column Control）和选取信息行控制（Selection Information Row Control），如图 5-5 所示。

通过相关信息窗口可以很方便地进行下列操作。

1）再选操作，如图 5-6 所示。

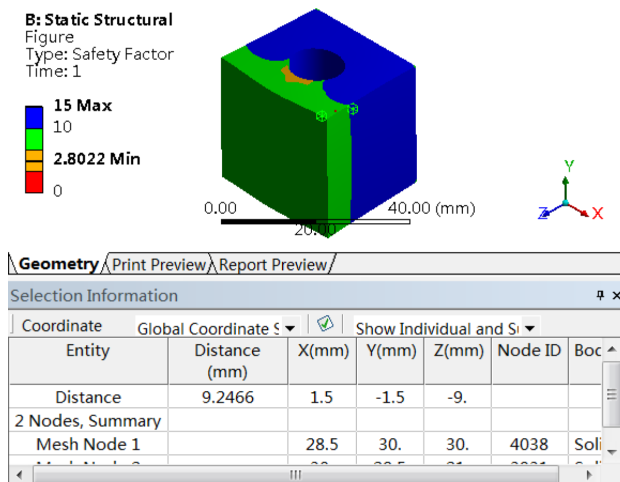


图 5-4　已选取的顶点的信息

Selection Information

Coordinate　Global Coordinate S　Show Individual and S

Entity	Distance (mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Node ID	Boc
Distance	9.2466	1.5	-1.5	-9.		
2 Nodes, Summary						
Mesh Node 1		28.5	30.	30.	4038	Soli

图 5-5　相关信息窗口控制功能区

Selection Information

Coordinate　Global Coordinate S　Show Individual and S

Entity	Distance (mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Node I
2 Nodes					
Mesh		28.568	30.	24.087	4085
Mesh		30.	28.5	24.	3934

Reselect
Export Text File
Refresh
Copy

a)

Selection Information

Coordinate　Global Coordinate S　Show Individual and S

Entity	Distance (mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Node ID	Bo
2 Nodes, Summary						
Mesh Node 1		30.	15.	16.508	4030	Sol
Mesh Node 2		30.	7.5	12.	3991	Sol

b)

图 5-6　再选操作

a) 再选取操作前　b) 再选取操作后

2）导出操作，如图 5-7 所示。

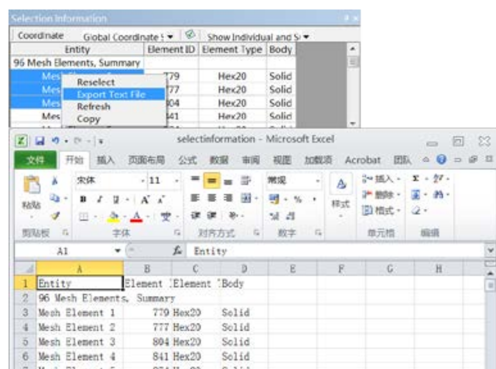
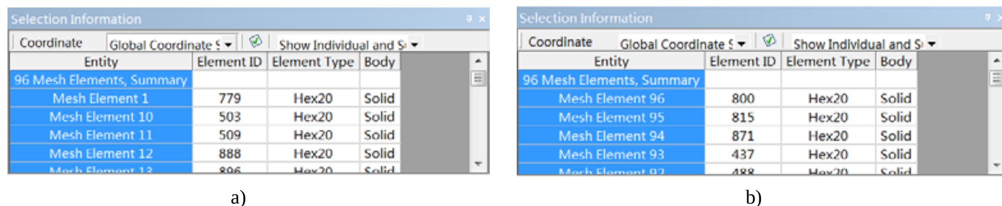


图 5-7 导出操作

3）排序操作，如图 5-8 所示。



a) b)

图 5-8 排序操作

a) 升序（单击“Entity”） b) 降序（再次单击“Entity”）

（2）工作表窗口（Worksheet Window） 工作表提供了树结构图中相应项的信息，表现的形式包括表格、图和文本等。

（3）图表数据窗口（Graph and Tabular Data Windows） 该窗口位于主界面下部。在树结构图中单击相应的项目（如分析设置、载荷、结果云图、查询结果和图表）时，下面的信息可能会显示在图表数据窗口中，载荷图表如图 5-9 所示。

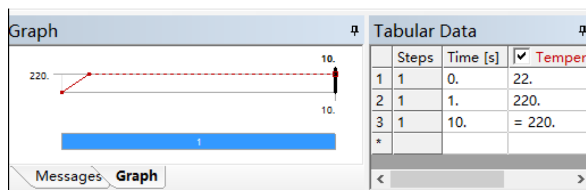


图 5-9 载荷图表

（4）信息窗口（Messages Window） 信息窗口提供了 3 种类型的信息（错误、警告和信息）显示，在操作中有重要的提示作用。典型的信息窗口如图 5-10 所示。

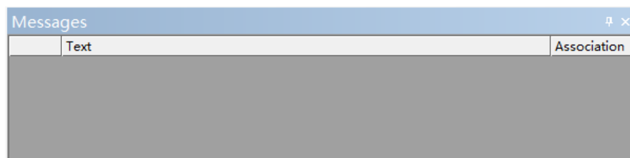


图 5-10 典型的信息窗口

（5）注释窗口（Graphics Annotation Window） 当在标准工具栏中单击“User Defined Graphics Annotation”按钮时，该窗口即会出现。可以通过该窗口来实现注释输入等操作。

（6）剖切平面窗口（Section Planes Window） 该窗口位于主界面左下方，外形如图 5-11 所示，提供了剖切平面操作。

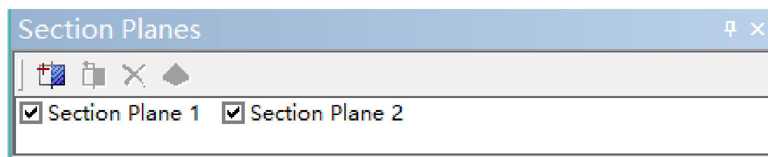


图 5-11 剖切平面窗口

（7）视图管理窗口（Manage Views Window） 该窗口提供了图形窗口视图管理功能。

（8）向导窗口（The Mechanical Wizard Window） 该类型窗口提供各种功能使用户更加便利地获取结果信息。

5．主菜单

主菜单如图 5-12 所示，包括文件（File）、编辑（Edit）、外观（View）、单位（Units）、工具（Tools）和帮助（Help）菜单。各个菜单的介绍见表 5-4～表 5-9。



图 5-12 主菜单

表 5-4 文件（File）菜单

命 令 项	功 能 描 述
Refresh All Data	更新几何模型、材料和树结构图中的任何导入载荷
Save Project	保存正在进行的项目的全部内容
Export	导出项目数据到项目外
Clear Generated Data	清除所有的结果数据和网格数据
Close Mechanical	关闭 Mechanical 应用

表 5-5 编辑（Edit）菜单

命 令 项	功 能 描 述
Duplicate	复制已选中的高亮目标
Duplicate Without Results	复制已选中的高亮目标，但不复制结果
Copy	复制对象
Cut	剪切对象
Paste	粘贴对象
Delete	删除对象
Select All	全选

表 5-6 外观（View）菜单（部分）

命 令 项	功 能 描 述
Shaded Exteriorand Edges	显示外表和边缘
Shaded Exterior	显示外表
Wireframe	显示框线图
Graphics Options	图形选项
Cross Section Solids(Geometry)	显示线实体的横截面
Thick Shells and Beams	显示壳体与梁的厚度
Visual Expansion	扩展显示（如用于循环对称模型显示）
Annotation Preferences	显示“Annotation Preferences”对话框
Annotations	注释显示开关
Ruler	比例尺显示开关
Legend	结果图例显示开关
Triad	坐标轴显示开关
Eroded Nodes	显示动力学开关

表 5-7 单位（Units）菜单

命 令 项	功 能 描 述
Metric(m,kg,N,s,V,A)	单位系统设置
Metric(cm,g,dyne,s,V,A)	
Metric(mm,kg,N,s,mV,mA)	
Metric(mm,t,N,s,mV,mA)	
Metric(mm,dat,N,s,mV,mA)	
Metric(μm,kg,μN,s,V,mA)	
U.S.Customary(ft,lbm,lbf,°F,s,V,A)	
U.S.Customary(in,lbm,lbf,°F,s,V,A)	
Degrees	将角度单位设置为度
Radians	将角度单位设置为弧度
rad/s	将角速度单位设置为弧度每秒
RPM	将角速度单位设置为转每分
Celsius	将温度单位设置为摄氏度
Kelvin	.将温度单位设置为开尔文

表 5-8 工具（Tools）菜单

命 令 项	功 能 描 述
Write Input File...	写 APDL 输入文件
Read Result File...	读取 APDL 输入文件
Solve Process Settings	设置求解过程
Addins...	加载“插件管理”对话框
Options...	定制“选项”对话框
Variable Manager	变量管理
Run Macro...	打开“宏文件查找”对话框

表 5-9 帮助（Help）菜单

命 令 项	功 能 描 述
Mechanical Help	打开帮助系统
About Mechanical	显示版本信息

6．工具栏

工具栏位于 Mechanical 界面的上部，有以下工具栏。

1）标准工具栏。

2）图形工具栏。

3）相关工具栏。

4）集合选取工具栏。

5）单位转换工具栏。

6）图形选项工具栏。

7）边缘图形工具栏。

8）树结构图过滤工具栏。

其中涉及的功能在前文中已基本介绍，这里不再叙述。

5.1.2 Mechanical 使用过程

Mechanical 使用过程的基本介绍如本小节中所述。

1．创建分析系统

使用前文中介绍的方法，针对需要进行的分析，向项目工程图中添加合适的分析系统；对于多分析系统组合的情况，应合理地选择和连接分析系统。

2．定义工程数据

零件的响应由设置的材料特性决定，这些特性在工程数据项中定义（选择“Engineering Data”项右击，并在弹出的快捷菜单中选择“Edit”可进入界面）。注意如下问题。

1）根据应用类型不同，材料特性可能为线性或非线性，可能与温度有关或无关。

2）线性材料特性可以为常量，也可以为与温度相关的变量；可以为各向同性，也可以为各向异性。

3）非线性材料特性通常为表格数据，如塑性塑胶、高弹性材料数据等。

4）为定义温度相关材料特性，必须输入数据定义特性−温度图。

5）可以通过将平时常用的材料添加到材料库中以减少分析工作量。

6）对于各向异性材料，默认采用全局坐标系；必要时应改为自定义的局部坐标系。

3．添加几何模型

ANSYS Workbench 17.0 可以用以下 3 种方式添加几何模型。

1）在 Workbench 中使用 Design Modeler 添加模型。

2）在 CAD 系统中单击 ANSYS Workbench 17.0 插件添加模型。

3）在 Workbench 中使用 External Model 组件系统添加几何模型。

应根据分析类型、已有的模型类型和其他相关的因素来选择合适的几何模型进行添加。

4．定义零件行为

添加几何模型后，选择项目工程图中分析系统的“Model”项右击，从弹出的快捷菜单中选择“Edit”，可以进行零件行为设置。对应的细节窗口如图 5-13 所示，在零件细节窗口常出现的一些项目如下：

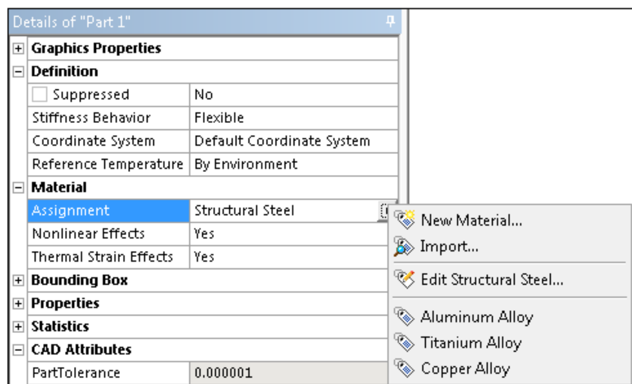


图 5-13　定义零件行为细节窗口

（1）刚度行为（Stiffness Behavior）　可以通过改变零件的刚度行为，设置零件为柔体、刚体或垫片，默认为柔体。

1）当设置零件为刚体时，可以采用集中质量来减少求解时间。

2）刚体仅需要密度来计算质量。

3）垫片仅用于静力结构分析中。

（2）坐标系（Coordinate Systems）　导入模型时，模型所在文件的全局坐标系原点将被自动放置到 Workbench 的坐标原点上，且各个方向相同。

全局坐标系总是存在的，但很多时候已经不能满足使用要求，因此在很多场合需要创建局部坐标系。

（3）参考温度（Reference Temperature）　参考温度一般由程序自动从环境温度设置中获得。当参考温度在进行不同的求解时发生了变化，就应该重新设置。当该项设置为 By Body 时，将对各个体进行单独的指派。但注意，参考温度并不是实体的实际温度。

（4）指派材料（Material Assignment）　为零件指定正确的材料是正确分析的基本保证。

（5）非线性材料效应（Nonlinear Effects）　默认情况下，程序将使用所有的材料数据，包括非线性材料效应，如应力-应变曲线。将该选项设置为 No，将忽略零件材料的任何非线性。

（6）热应变效应（Thermal Strain Effects）　在结构分析中，可通过将 Thermal Strain Effects 设置为 Yes 来计算热应变结果。

（7）横截面（Cross Section）　在导入了线实体后，在线实体的细节窗口中将显示横截面的有关信息。

5．定义连接

可用的连接的类型包括：

➢ 接触（Contacts）——定义不同实体间的接触行为。

➢ 连接（Joints）——通过限制一定的自由度来进行零部件的连接。
➢ 网格连接（Mesh Connections）——用来连接不相连的面实体上的网格。
➢ 弹簧（Springs）——定义连接实体的弹性元件。
➢ 轴承（Bearings）——用来限制相对运动但允许旋转的连接。
➢ 梁连接（Beam Connections）——用来建立体-体或体-地基之间的连接。
➢ 端点释放（End Releases）——用于顶点上自由度的释放。
➢ 定位焊（Spot Welds）——连接不同的零件来形成装配。

6．网格划分与控制

注意求解时间花费和求解结果精度间的矛盾，应合理地选择网格划分密度和方式等。

7．分析求解设置

无论哪一种分析类型，均需要进行求解设置。例如，通过设置大变形效应来向结构分析中添加大变形响应，以进行非线性几何结构分析。这些具体的设置将在介绍有关的分析时叙述。

除了针对分析类型的设置外，通用的设置还包括多载荷步的设置。可以通过以下几种方式进行多载荷步的设置。

1）在树结构图中选择“Analysis Settings”，并在细节窗口中修改 Number of Steps 为所需要的载荷步的数量。

2）在树结构图中选择“Analysis Settings”，并在 Tabular Data 窗口中通过增加表格的行数来添加新的载荷步。

3）在树结构图中选择“Analysis Settings”，并在 Graph 窗口中通过在图上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert Step”命令来添加新的载荷步。

以上操作所需的图形构成如图 5-14 所示。

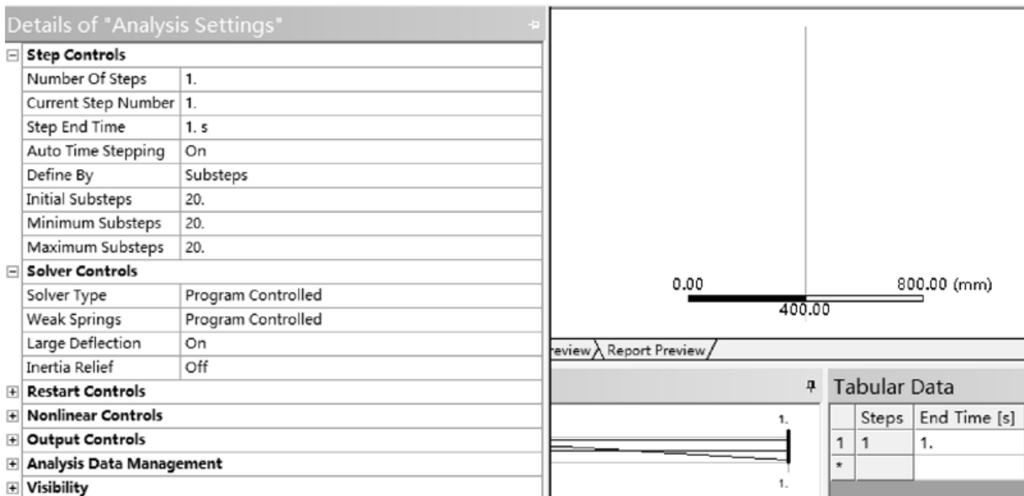


图 5-14　多载荷步的设置

添加载荷步后，可以对载荷步进行设置。设置完成后，可以通过单击工具栏中的“Worksheet”按钮查看设置，如图 5-15 所示。

Properties	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Step Controls				
Step End Time	0.1	2.	3.	4.
Auto Time Stepping	Program Controlled	On	Off	On
Define By	N/A	Substeps	Substeps	Substeps
Carry Over Time Step	N/A	Off	N/A	Off
Number Of Substeps	N/A	N/A	1	N/A
Initial Substeps	N/A	6	N/A	1
Minimum Substeps	N/A	5	N/A	1
Maximum Substeps	N/A	10	N/A	10
Nonlinear Controls				
Force Convergence	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled
Line Search	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled	Program Controlled
Output Controls				
Calculate Stress	Yes	Yes	Yes	Yes
Calculate Strain	Yes	Yes	Yes	Yes
Calculate Results At	All Time Points	All Time Points	All Time Points	All Time Points

Analysis Settings

图 5-15　查看载荷步设置

8．定义初始条件

不同分析类型需要定义初始条件见表 5-10，这时在树结构图中将自动生成相关的项。

表 5-10　不同分析类型的初始条件项

分 析 类 型	树结构图项	描　　述
瞬态结构分析	Initial Conditions	可以通过 Initial Conditions添加初始速度等
显式动力学分析	Initial Conditions Pre-Stress	可以通过 Initial Conditions添加初始速度或角速度 可以通过 Pre-Stress添加预应力
模态分析	Pre-Stress	可以通过 Pre-Stress添加预应力
线性屈曲分析	Pre-Stress	可以通过 Pre-Stress添加预应力
谐响应分析（完全法）	Pre-Stress	可以通过 Pre-Stress添加预应力
随机振动、响应谱、谐响应（模态叠加法）、瞬态结构分析（模态叠加法）	Initial Conditions Modal	可以通过 Initial Conditions添加初始速度或角速度 可以通过 Modal获得模态求解结果
稳态热分析	Initial Temperature	可以通过 Initial Temperature添加初始温度
瞬态热分析	Initial Temperature	可以通过 Initial Temperature添加初始温度

9．施加预应力效应

预应力效应在很多场合都存在。在进行施加时，根据分析类型是否为显式或隐式进行不同的添加，相关的内容请参考帮助文档，这里不再详述。

10．设置边界条件

载荷与约束被称为边界条件，只有在正确的设置情况下，才能反映真实的载荷情况。相关的细节将在 5.2.6 节讨论。

11．求解

这个过程基本为用户交互过程，但求解发生错误时应特别注意求解过程的信息。

12．结果处理

将求解结果以合适的方式表现出来，相关的细节将在 5.2.7 节讨论。

13．生成报告

此为可选步骤。生成报告进行存档并查看，将有助于学习和改进。

5.1.3 Mechanical 支持的分析

使用 Mechanical 中提供的分析系统，可以进行很多类型的分析。如果需要进行更复杂的分析，可以尝试连接不同的组件来搭建新的分析系统。如果对 APDL 非常熟悉的话，还可以在分析中插入 APDL 程序，这样完全可以完成更多类型的分析。

下面是一些直接使用 Mechanical 中提供的分析系统可以完成的分析。

1）设计评估分析。

2）电场分析。

3）显式动力学分析。

4）线性动力学分析。

5）电磁分析。

6）刚体动力学分析。

7）静态结构分析。

8）稳态热分析。

9）热–电分析。

10）瞬态结构分析。

11）瞬态热分析。

12）特殊类型分析，如疲劳分析、断裂分析等。

本书将重点说明这些分析的操作方法。

5.2 Mechanical 使用

本节对常见的使用过程的步骤进行说明。

5.2.1 设置材料属性

在Workbench中由Engineering Data控制材料属性，它是每项工程分析的必要条件，作为分析项目的开始，Engineering Data可以单独打开。

1. 进入 Engineering Data 应用程序

进入 Engineering Data 应用程序有两种方法：

1）通过拖放或双击添加工具箱中的分析系统，然后双击“Engineering Data”选项。

2）在分析项目“Engineering Data”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Edit”（编辑）命令。

进入 Engineering Data 应用程序后，显示界面如图 5–16 所示，窗口中的数据是交互式层叠显示的。

2. 材料库

在Engineering Data应用程序窗口中右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”（工程数据库）命令，如图 5–17 所示，此时窗口会显示Engineering Data Sources数

据表，如图 5–18 所示。

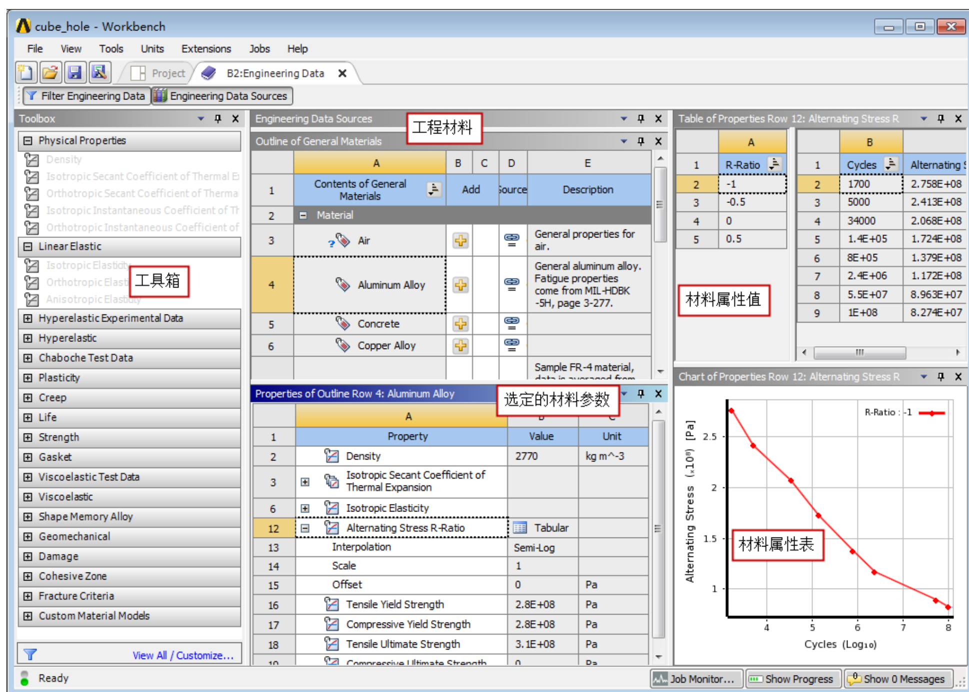
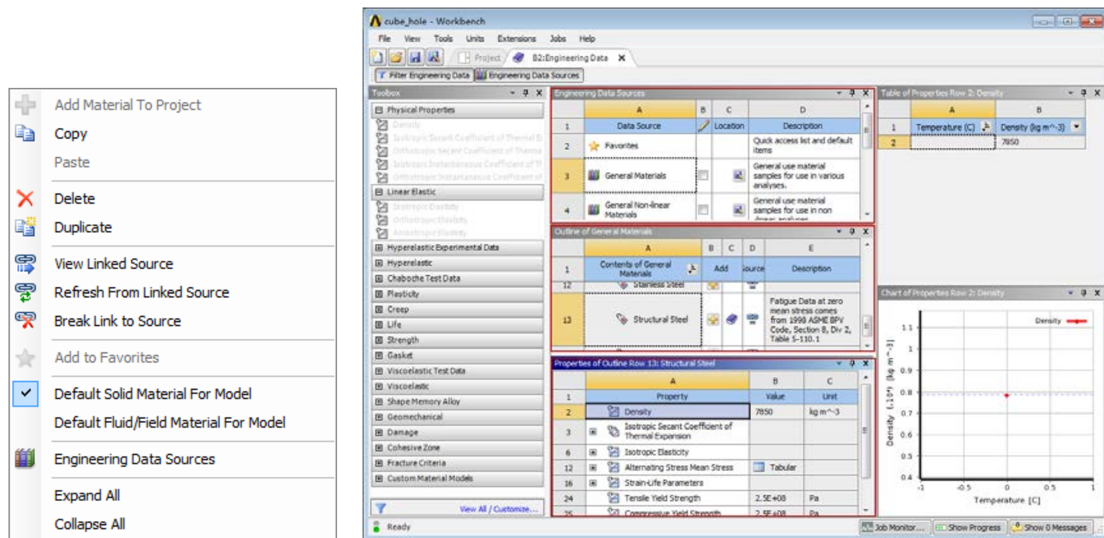


图 5–16　Engineering Data 应用程序界面

在Engineering Data Sources数据表中选择A列表“Data Source”（数据源）后，在Outline of General Materials（基本材料列表）中会出现相应的材料库。



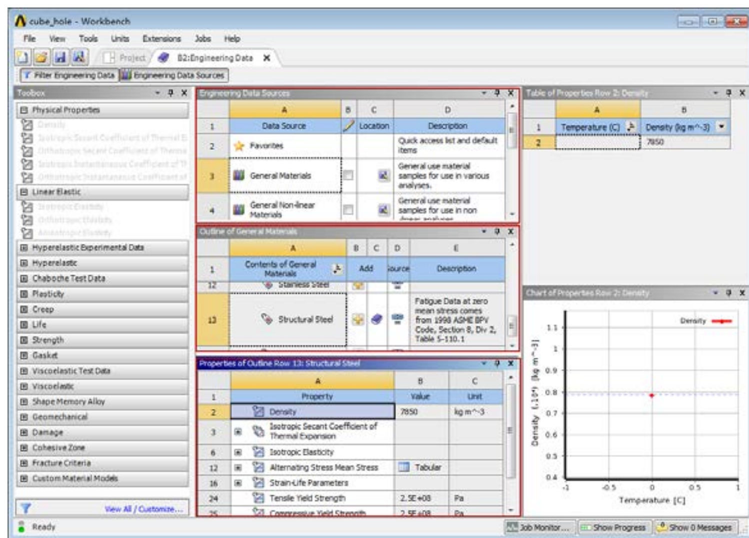


图 5–17　快捷菜单　　　　　　图 5–18　显示 Engineering Data Sources 数据表的窗口

材料库中保存了大量的常用材料数据，选中相应的材料后，在选定的材料性能中可以看到默认的材料属性值，该属性值可以进行修改，以符合选用的材料特性。

对于 Engineering Data Sources 数据表的说明如下所述。

➢ A 列 Data Source（数据源）——显示的是材料库清单，其中 A2 Favorites 中的材料在每个分析项目中都会存在，无需由材料库添加到分析项目。

➢ B 列（编辑锁定）——当复选框选中（）时，表示该材料库不能编辑，当复选框没有选中（）时，表示该材料库可以进行编辑操作。



需要修改材料属性时，现有的材料库必须要解锁，而且这是永久的修改，修改后的材料存储在该材料库中。对当前项目中的工程数据资料进行修改时不会影响材料库。

➢ C 列 Location（本地）——当 B 列复选框没有选中（）时，可以浏览现有材料库，或材料库的位置。

3. 添加材料

将现有的材料库中的材料添加到当前分析项目中，需要在 Engineering Data 中的 Outline of General Materials 中单击材料后面 B 列中的“添加”按钮。此时在当前项目中定义的材料会被标记为，表明材料已经添加到分析项目中，添加过程如图 5-19 所示。

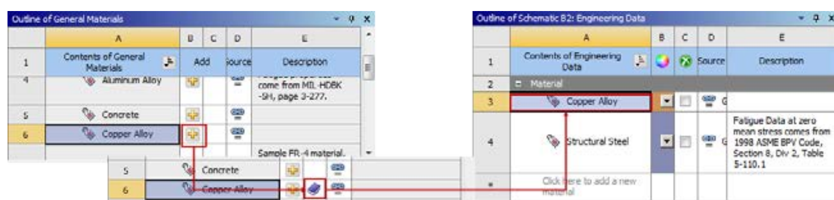


图 5-19　添加材料

如果需要将材料添加到 Favorites 中，以方便以后分析过程无需再添加此材料，需要在相应的材料上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Add to Favorites”命令即可，如图 5-20 所示。

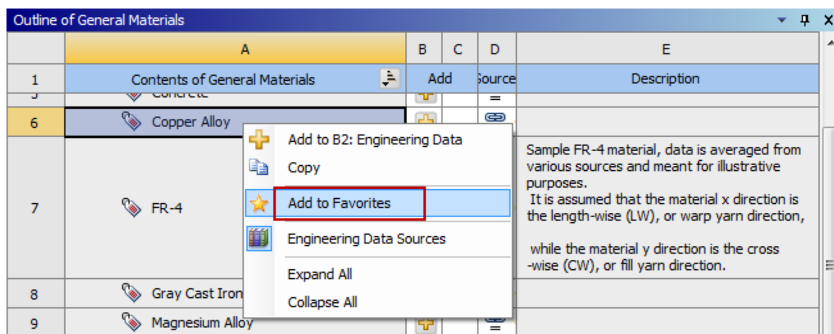


图 5-20　将材料添加到 Favorites

4. 添加材料属性

在 Engineering Data 中的工具箱中提供了大量的材料属性，通过工具箱可以定义现有的或新的材料属性。

工具箱中的材料属性包括物理特性（Physical Properties）、线弹性（Linear Elastic）、实验应力-应变数据（Experimental Stress Strain Data）、超弹性（Hyperelastic）、蠕变（Creep）、

寿命（Life）、强度（Strength）、衬垫（Gasket）等，如图 5-21 所示。

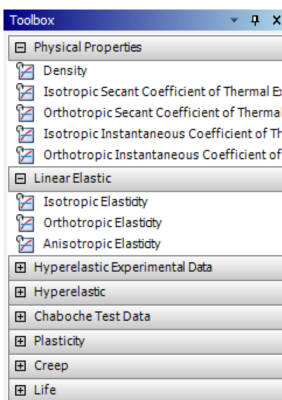


图 5-21　材料属性工具箱

对材料添加新属性的步骤如下。

步骤 01 在“工程材料”列表中选择材料库的存储路径。

步骤 02 单击“Click here to add a new material”选项，在空白处输入材料名称（如 New Material），对新材料进行标识。此时在列表中添加了一种没有任何属性的材料。

步骤 03 在工具箱中双击或拖放新材料所需要的属性，将相应材料性能添加到“材料性能”列表中去。

步骤 04 此时添加的材料性能没有数值，空白区显示为黄色，提示用户输入数值，如图 5-22 所示，可在空白处输入属性的值。

步骤 05 按照步骤03～04的操作方法将项目分析中用到的材料性能添加到材料中去，如此即可创建一种新材料。



根据项目分析的要求，按照上面的方法建立自己的材料库，以方便在分析中应用。

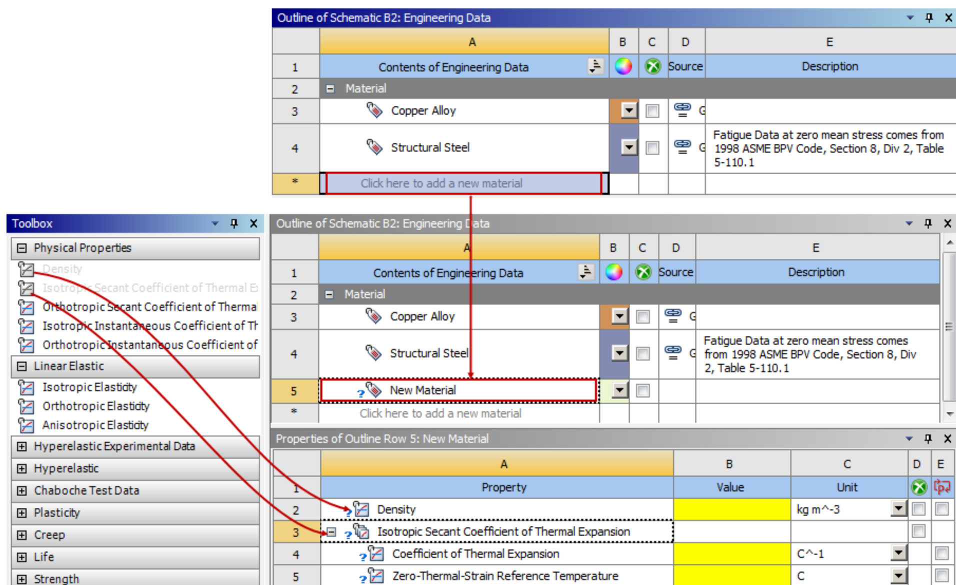


图 5-22　添加材料性能

5.2.2 设置几何模型

1．几何模型基础

虽然没有对零件的数量进行限制性规定，但必须注意大的装配将需要更多的求解资源。在零件与零件的接触部位，将会出现自动定义的接触边界，这可以使得载荷在不同的

零件间传递。

零件是由一系列的实体构成的。零件中还可以包括由多个实体构成，被称为“多体零件”的零件。对于多体零件而言，在实体的连接部位将共享节点。

零件可能包括：

1）一个或多个三维实体。

2）一个或多个面实体。

3）一个或多个线实体。

4）面实体与线实体的组合。

其余的组合方式，目前尚不支持。关于零件和装配等，下面将详细介绍。

（1）多体零件　当从 DM 中向 Mechanical 中引入多体零件后，显示的多体零件下将包含实体组（零件）和原型（实体）。当零件仅包含一个实体时，实体组将会自动隐藏。

（2）零件　下面是一些可以在零件上进行的操作。

1）每个零件都可以分配不同的材料。

2）零件可以显示或隐藏。

3）零件可以被抑制来减少处理对象。

4）零件间的接触检测允差和接触类型可以被控制。

5）可以通过自定义的局部坐标系来设置零件参数。

（3）关联　关联是作用在从 DM 引入的几何模型上的，其可以在几何模型需要更新的时候，保接接触区域设置、边界条件设置、网格连接设置等相对不变。例如，关联在下列场合中非常重要：模型包括 6 个不同的零件，每个零件包含 1 个实体；模型上施加了载荷，在 DM 中重新将 6 个实体分组构成了 2 个多体零件；在几何模型更新后，边界条件的作用对象依然保持不变。

（4）实体　下面是一些对实体进行的操作。

1）实体可以构成零件，这时它们几何上相连，因此可以共享节点。

2）每个实体都可以被指派不同的材料。

3）可以对实体进行显示或隐藏。

4）可以对实体进行抑制。

5）位于不同零件内容实体可以被声明为刚体。

6）可以为实体指派局部坐标系。

（5）假设和限制

1）热分析和形状分析不支持面实体和线实体。

2）进行节点共享的多个体必须有相互接触的面或边缘。

3）在一个多体零件中，不同体间将会进行自动接触检测。

2．三维实体

在 Mechanical 中可以求解三维实体模型，包括单独的零部件和装配，且在有充足的时间和资源的情况下，可以求解任何复杂度的实体模型分析。

3．面实体

通过很多操作可以引入面实体。例如，通过抽取三维模型的中间面可以得到面实体。该面实体可获得三维实体的厚度作为输入条件。

面实体可以构成零件。零件中可以保存多个面实体，除此之外还可以同时包含线实体。零件中包含的面实体可以通过定位焊或接触进行连接。

下面是关于面实体的一些基本讨论。

（1）面实体装配　Mechanical 提供了很多方法来完成面实体装配可连接性的检测：

1）确认面实体之间是不是在拓扑学上相连。

2）确认面实体的网格的连接性。

3）修复面实体之间缺失的连接。

（2）厚度模式　通过厚度模式和厚度值可以控制面实体的厚度，这两个项在面实体的细节窗口中显示。

（3）壳偏移　面实体具有法向，相应的具有顶面和底面。如图 5−23 所示，在网格显示的条件下，出现了顶面（top）和底面（bottom），其位置由法向（normal）决定。

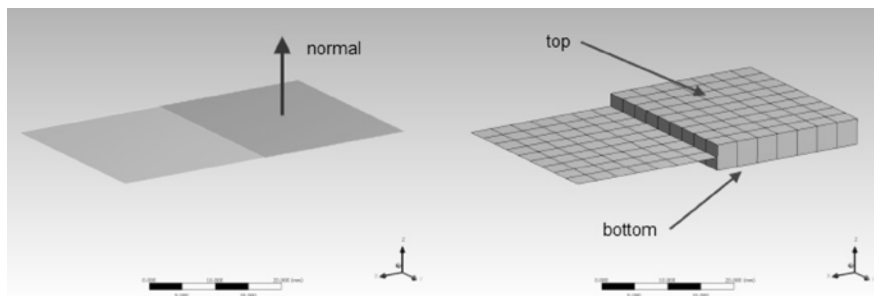


图 5−23　面实体的法向、顶面与底面

在细节窗口的 Offset Type 中可以定义 4 种类型的壳体偏移：

- Top——壳顶面与面实体对齐，如图 5−24a 所示。
- Middle（Membrane）——壳中间面与面实体对齐（默认项），如图 5−24b 所示。
- Bottom——壳底面与面实体对齐，如图 5−24c 所示。
- User Defined——用户定义由壳体中间面出发的、沿着法向的某矢量距离所在的面与面实体对齐，如图 5−24d 所示。

（4）截面　通过选择相应的面实体对象，在工具栏中单击“Layered Section”或右击，在弹出的快捷菜单选择“Insert”→“Layered Section”命令，均可以插入一个截面 Layered Section 对象。

在 Layered Section 对象的细节窗口中的 Layers 行中选择“Worksheet”打开工作表，然后在工作表中添加截面信息。需要的操作包括：

1）右击表格任何区域，在弹出的快捷菜单中选择“Add Layer”，向工作表中添加行。

2）单击 Material 列中相应的表格，并在下拉菜单中选择材料。

3）单击 Thickness 列中相应的表格，并在其中填写层的厚度。

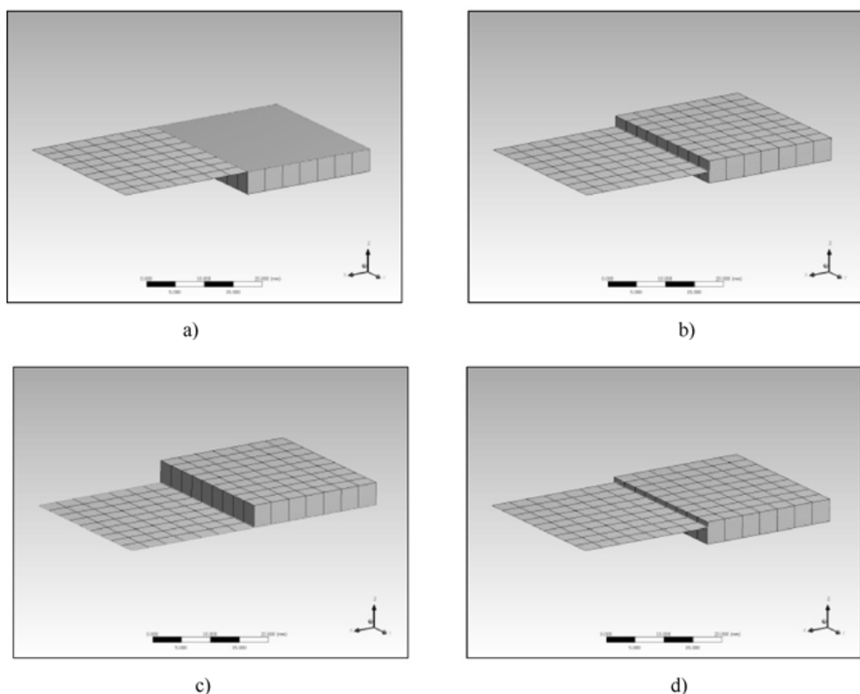
4）单击 Angle 列中相应的表格，并在其中填写材料的方向。

5）如需更多层，右击表格任何区域，在弹出的快捷菜单中选择“Add Layer”。

4．线实体

使用线实体时必须注意，所有的线实体只有在与截面关联的情况下才能进行有限元分

析。这样的关联一般在 DM 中进行。



a)　　b)　　c)　　d)

图 5-24　4 种不同的偏移方式

a) Top　b) Middle　c) Bottom　d) User Defined

5．模型装配

通过 Mechanical Model 系统、分析系统和 External Model 系统，可以创建多个已划分网格模型的装配体。例如：

1）装配 Mechanical Model 系统模型，如图 5-25 所示。

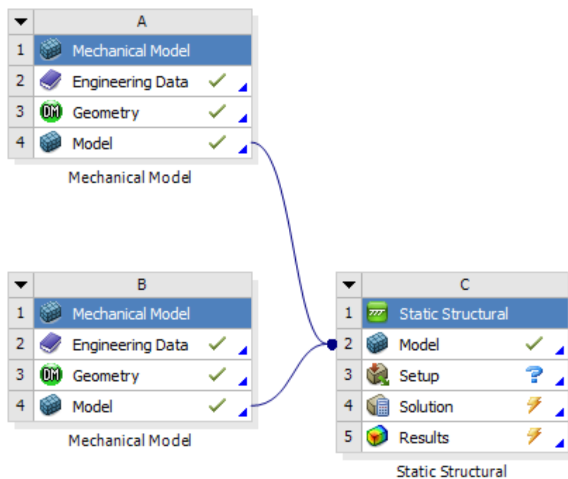


图 5-25　装配 Mechanical Model 系统模型

2）装配 Mechanical Model 和分析系统模型，如图 5-26 所示。

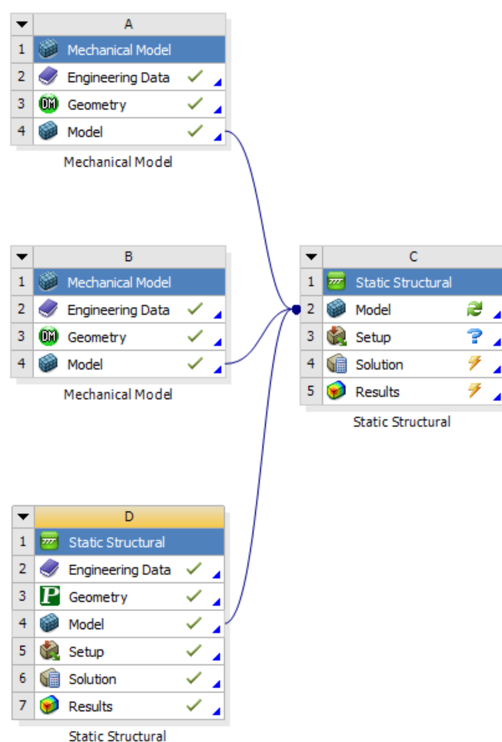


图 5-26 装配 Mechanical Model 和分析系统模型

3）装配 Mechanical Model 和 External Model 系统模型，如图 5-27 所示。

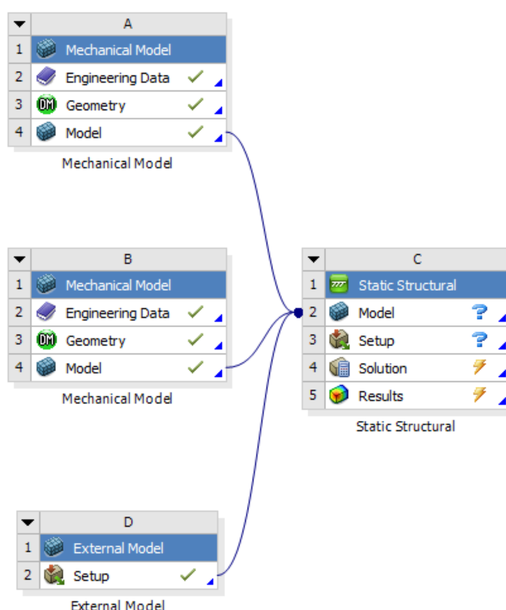


图 5-27 装配 Mechanical Model 和 External Model 系统模型

6．模型装配转换

对于引入的模型，通常需要进行单位设置和位置转换等，转换的界面如图 5-28 所示。

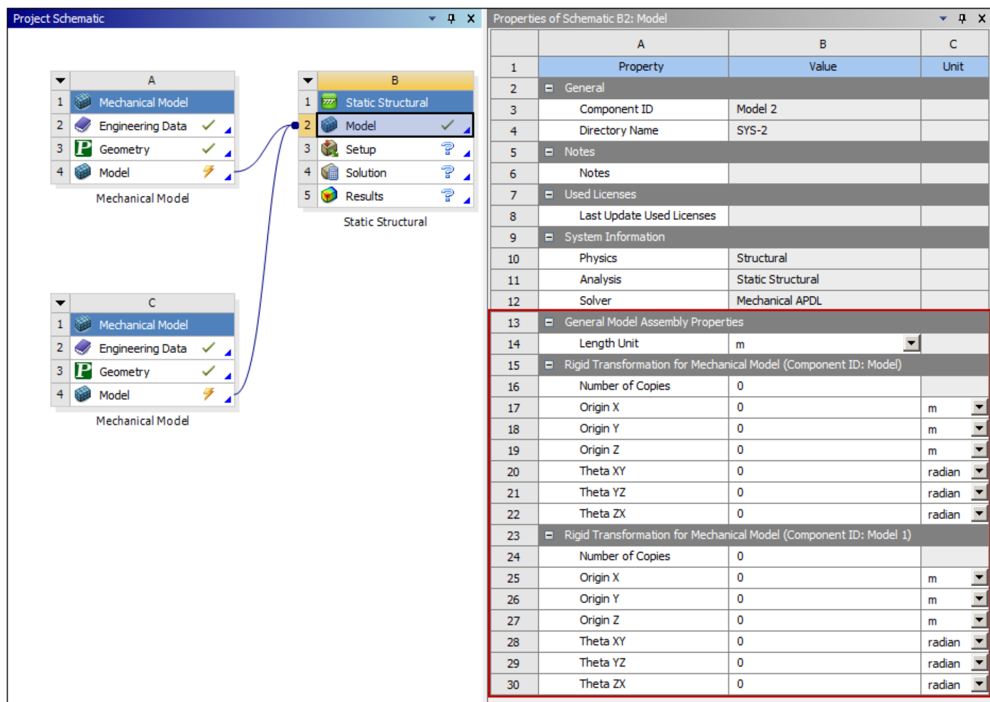


图 5-28　模型装配转换设置

7．刚体

在 Mechanical 中可以定义实体、实体群、面实体为刚体或柔体。刚体在求解的时候将不会发生变形。设置刚体的步骤如下。

1）在树结构图中选择相应的实体。

2）在细节图的“Stiffness Behavior”选项中选择“Rigid”。

8．二维分析

使用合适的二维分析可以节省大量的求解时间。在 Workbench 中配置二维分析的过程包括：

1）在 DM 或其他 CAD 中，在 *XY* 平面上创建面实体。

2）在项目工程图相应的“Geometry”项的属性列表中设置 Analysis Type 为 2D。在树结构图的“Geometry”项的细节窗口可以设置模型的 2D Behavior 为：

- Plane Stress 平面应力——模型在 *Z* 向没有应力，但有应变。
- Axisymmetric 轴对称——模型代表的对象为该模型绕 *Y* 轴旋转 360° 后的模型，在施加载荷的时候，需要按 360° 模型来考虑。
- Plane Strain 平面应变——模型在 *Z* 向没有应变，但有应力。
- Generalized Plane Strain——与平面应变的情况类似，但假设模型在 *Z* 向上的长度是有限的，并且不一定平行于 *Z* 向，其通常比 Plane Strain 更切合实际。

➢ By Body 按体选择——可以对不同的体赋予不同的二维行为。

9．对称

使用对称功能可以使求解的工作量少，因此在实际操作中有巨大的应用价值。如图 5-29 所示，可以用右侧的 1/4 模型代替左侧的整体模型进行分析，该 1/4 模型可由对称操作从整体模型得到。

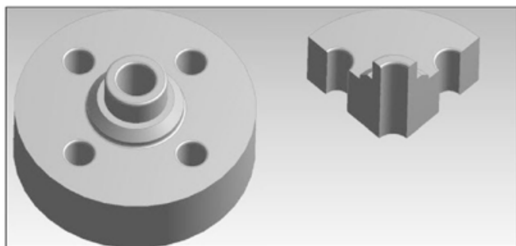


图 5-29　整体模型和 1/4 模型

在 Mechanical 的树结构图中，“Symmetry”项支持下列 3 个对象：

1）Symmetry Region——支持结构分析。

2）Periodic Region——支持电磁分析。

3）Cyclic Region——支持结构分析和热分析。

在 Symmetry Region 中支持：

1）结构对称和反对称，其对于约束和载荷的影响如图 5-30 和图 5-31 所示。

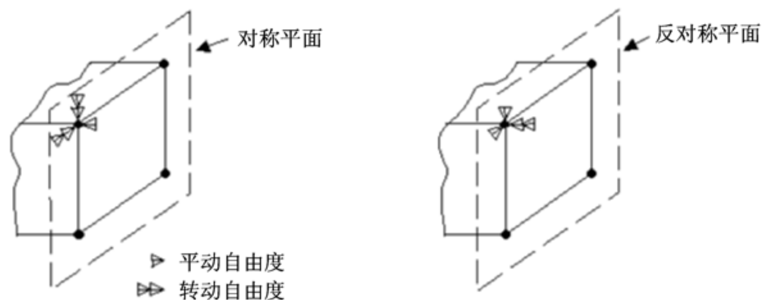


图 5-30　对平面内的节点施加对称与反对称边界约束条件

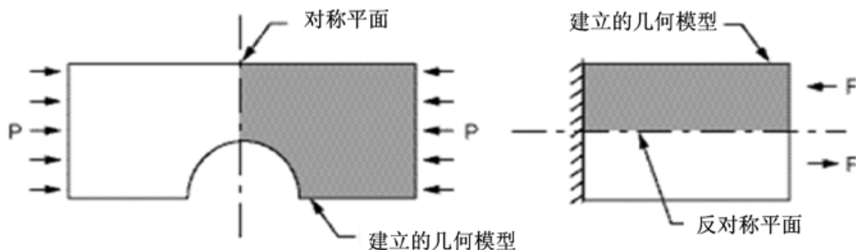


图 5-31　对称或反对称载荷条件

2）结构线性周期对称，其对于约束和载荷的影响如图 5-32 所示。

3）电磁对称和反对称。

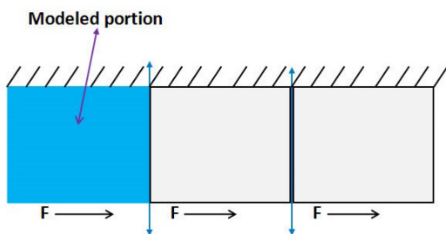
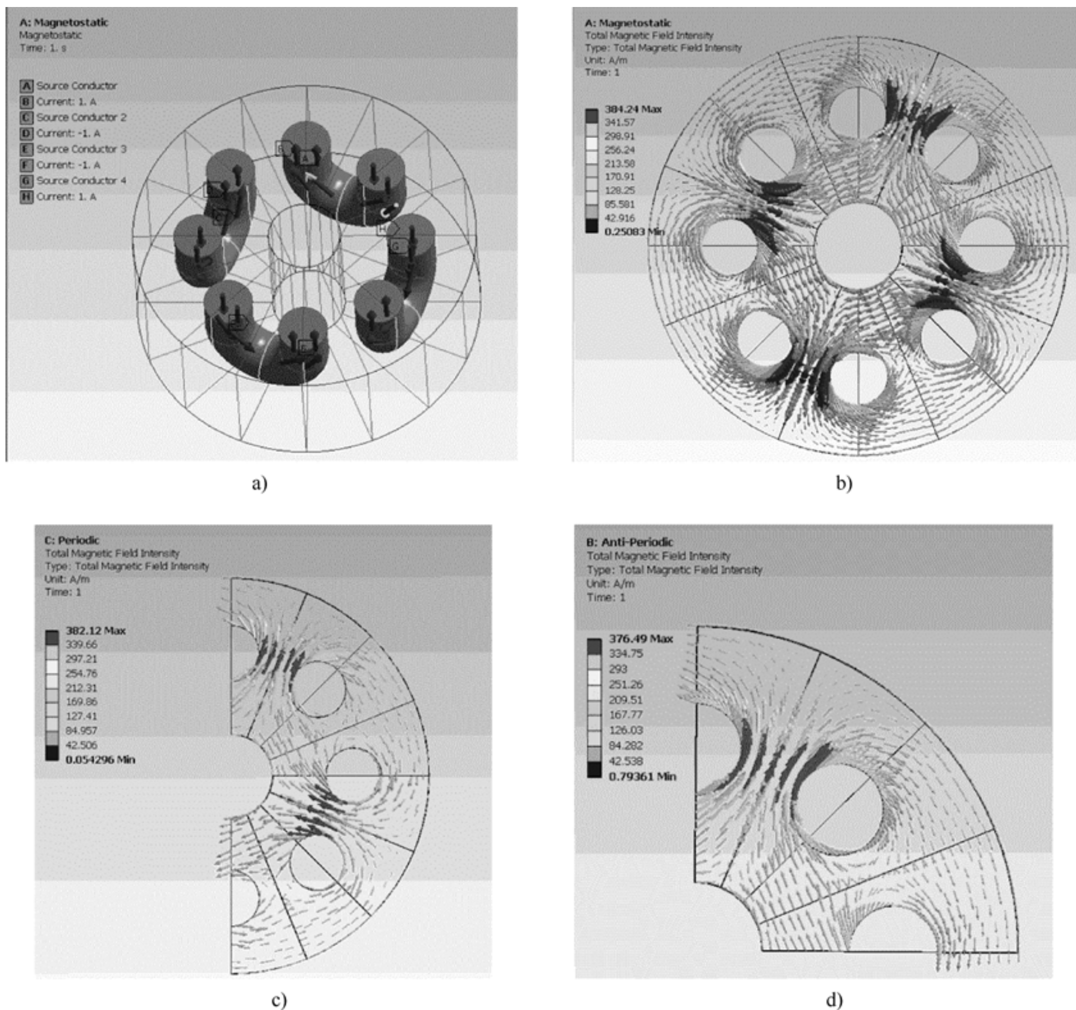


图 5−32 结构线性周期对称

4）显式动力学对称。

周期对称对象仅在电磁分析中使用，包括周期对称模型和反周期对称模型两类。图 5−33 所示为周期对称的典型应用，如果取 1/2 模型进行分析，应设置周期对称条件；如果取 1/4 模型进行分析，应设置反周期对称条件。



a) b) c) d)

图 5−33 周期对称示例

a) 模型载荷 b) 求解结果 c) 1/2 周期对称模型 d) 1/4 反周期对称模型

待分析的结构如果呈现出循环对称特点，例如，涡轮机叶轮或直齿轮等，则可以仅通过反映结构特征的部分模型来分析整体结构。

循环对称中，反映结构特征并用于建模的部分称作基本扇区。基本扇区在全局圆柱坐标系（CSYS=1）中旋转重复 *n* 次即能生成整个模型。如图 5-34 所示定义了循环对称结构的一个基本扇区。

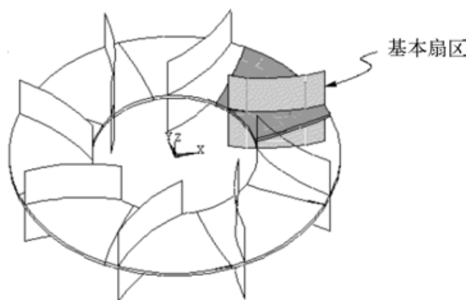


图 5-34　基本扇区

10．集合

在 Mechanical 中经常出现的 Named Selections，代表的是一系列选取操作得到的实体、面、线、点、单元或节点的集合。创建集合的方法包括：

1）在树结构图 Model 对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Named Selection”命令；也可以在 Named Selections 或其中的项上右击进行操作；或直接在工具栏中单击“Named Selection”。

2）在树结构图中相应的对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Create Named Selection”命令，如图 5-35 所示。

3）在图形窗口中选择对象后右击，在弹出的快捷菜单中选择“Create Named Selection”命令，如图 5-36 所示。

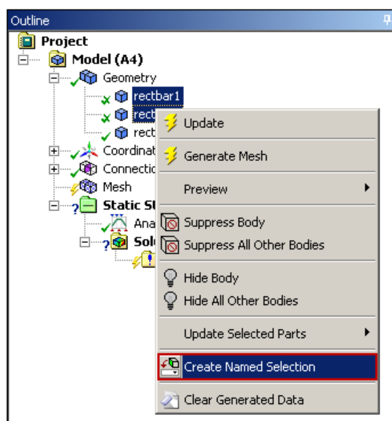


图 5-35　树结构图中创建 Named Selection

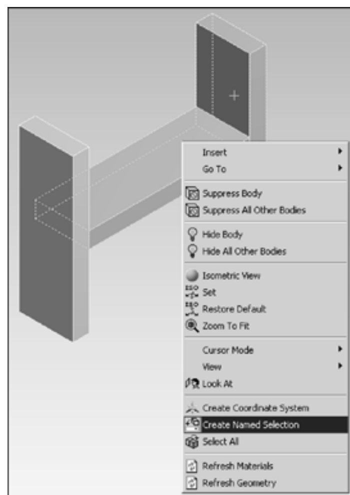


图 5-36　图形窗口中创建 Named Selection

除了创建集合外还可以从各种特殊的场合提取 Named Selection，如图 5-37 所示。



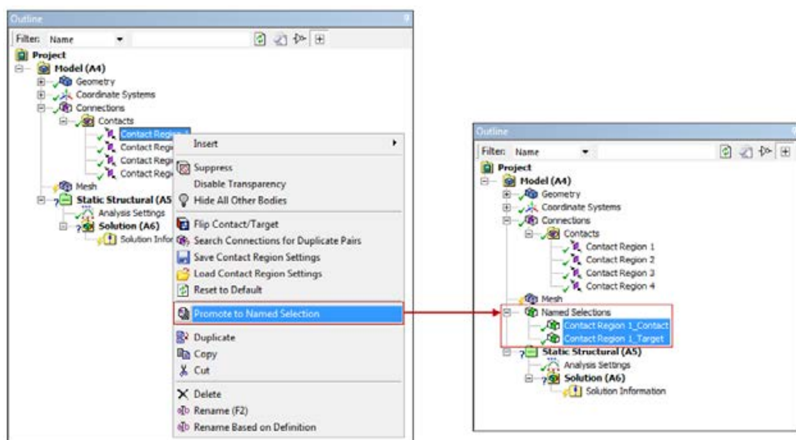


图 5–37　提取 Named Selection

使用集合可以很快捷地进行对象选取操作，还可以为特殊对象建立特定的标识，这在实际操作中有极大的价值。

11．定义路径

路径是由用户定义的空间曲线，可以映射该曲线上的求解结果。路径由一系列的点构成，结果就是在这些点上求取的。可以通过两种方式定义路径：

1）通过起点和终点。根据选取的坐标不一样，得到的路径形状也不同，在直角坐标系中为直线，在圆柱坐标系中为螺旋线。

2）通过边缘定义。

图 5–38 所示为定义的路径并映射了结果的图形显示。注意到在图形下方的图表中有路径数据结果。

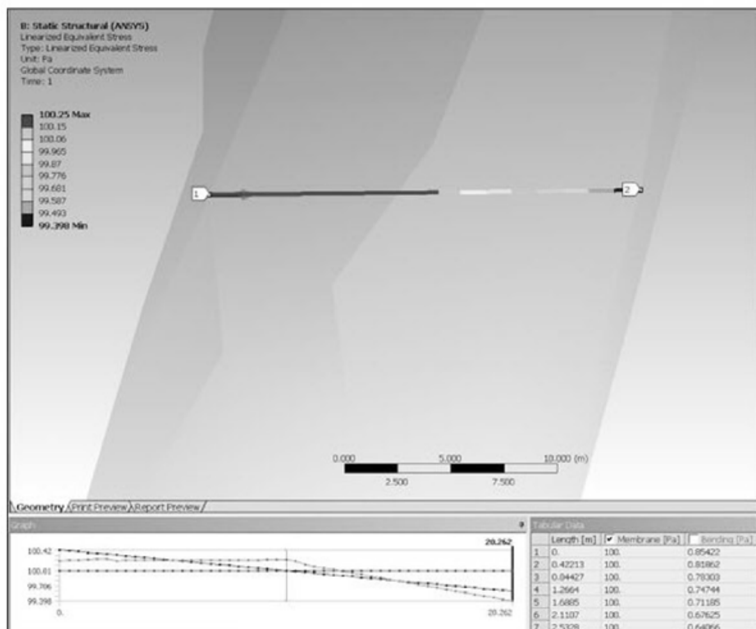


图 5–38　定义路径及路径结果

12．定义剖面

剖面的作用与路径类似，不同的是前者的表现形式为面。定义剖面的操作如下。

1）选中 Model，然后单击“Construction Geometry”。

2）选中“Construction Geometry”，然后单击“Surface”。

3）通过坐标系定义参考的剖切面。

13．远端点

远端点可以用来定义不直接作用在模型上的边界条件。通过选中“Model”然后单击“Remote Point”，在细节窗口中进行设置便可定义远端点。

可以通过设置 Remote Point 对象的细节窗口中的“Graphics”项为 Show Connection Lines 来查看远端点的连接线，如图 5-39 所示。

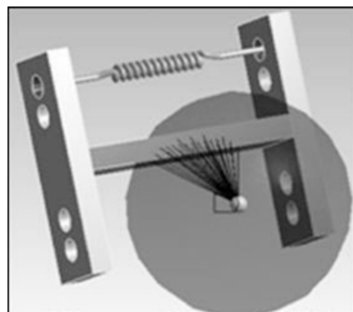


图 5-39　远端点连接

14．点质量

点质量可以用来将体的惯性效应理想化。可以通过以下方式定义点质量。

1）选择 Geometry 对象或其下的子对象。

2）单击 Point Mass 或右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Point Mass”命令（或者图形窗口中选择几何对象）来添加 Point Mass 对象。

3）在细节窗口设置 Scoping Method 为相应的选取方式。

4）在细节窗口设置 Mass 和其他选项。

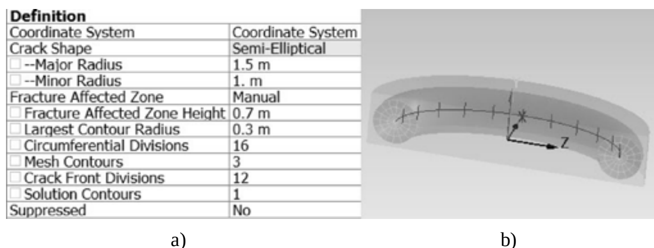
15．热源点

在瞬态热分析中可以设置热源点来模拟理想热源。其定义方式类似点质量。

16．裂纹

裂纹由裂纹前缘（顶端）、裂纹面、裂纹法向和裂纹方向构成。在 Mechanical 里，裂纹由裂纹（Crack）对象或预划分裂纹对象（Pre-Meshed Crack）进行定义。这两个对象可以插入到“Fracture”项下。

如图 5-40 所示定义了一个裂纹，其细节如图 5-40a 所示，其结构如图 5-40b 所示；其各个参数如图 5-41 所示。



Definition	
Coordinate System	Coordinate System
Crack Shape	Semi-Elliptical
--Major Radius	1.5 m
--Minor Radius	1. m
Fracture Affected Zone	Manual
Fracture Affected Zone Height	0.7 m
Largest Contour Radius	0.3 m
Circumferential Divisions	16
Mesh Contours	3
Crack Front Divisions	12
Solution Contours	1
Suppressed	No

a)　　b)

图 5-40　裂纹定义

a) 细节　b) 结构

17．垫片

垫片结构是分析中常见的一种特殊结构，由于其响应的特殊性在分析中需要单独处理。

在 Workbench 中进行垫片仿真，通常需要进行以下步骤。

1）定义垫片材料。

2）设置对象的 Stiffness Behavior 为 Gasket。

3）设置 Gasket Mesh Control 对象，并划分网格。

4）求解并查看垫片结果。

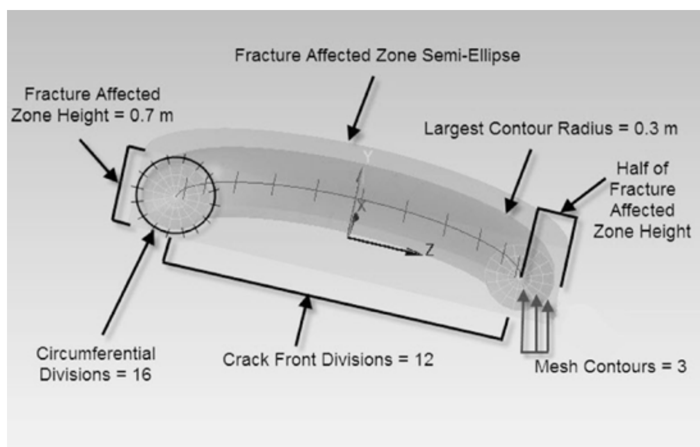


图 5-41　裂纹影响区域参数

5.2.3 设置坐标系

默认条件下，Mechanical 中所有的几何模型均在全局坐标系中显示。全局坐标系是一个位于原点固定的直角坐标系。

但在很多时候，如使用弹簧、连接，或施加载荷、查看结果的情况下，有必要提供特殊的局部坐标系以支持操作。下面介绍坐标系设置的内容。

1．创建坐标系

坐标系可以在空间位置或实体面上进行创建。创建的过程一般包括：

1）创建坐标系对象（Coordinate System）。

2）设置坐标系类型（Type），可设置为直角坐标系（Cartesian）或圆柱坐标系（Cylindrical）。

3）设置坐标系原点位置。

4）设置坐标系的 3 个方向。

2．将坐标系作为参考位置

在 Mechanical 中创建或导入的局部坐标系，可以用于 Part、Point Mass、Spring、Acceleration、Standard Earth Gravity、Rotational Velocity、Force、Bearing Load、Remote Force、Moment、Displacement、Remote Displacement 或 Contact Reaction 等一系列对象中，作为参考位置。设置的步骤为：

1）选择待操作的对象。

2）对大部分的可操作对象，在细节窗口中设置 Define By 为 Components。

3）在细节窗口中设置 Define By 为 Coordinate System，作为需要的局部坐标系。

3．将坐标系作为连接位置

在创建连接后，必须对连接设置相应的坐标系。操作方法同上。

4．创建剖切平面

使用坐标系的 *XY* 平面可以自动创建剖切平面。

5．创建剖面

通过任何坐标系都可以创建 Surface 对象，创建操作如图 5-42 所示；创建得到的 Surface 对象的细节如图 5-43 所示。

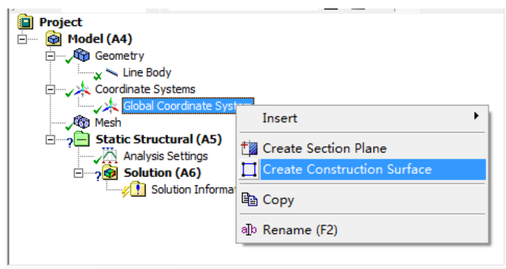


图 5-42　创建 Surface 对象

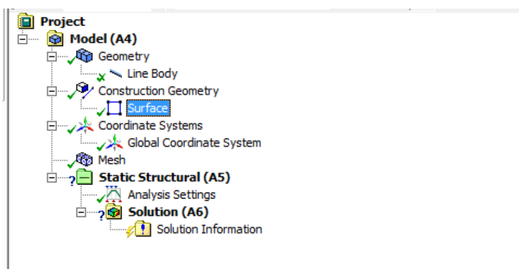


图 5-43　对象细节

5.2.4 定义连接

在 Mechanical 中可以创建的对象包括：Contact、Mesh Connection、Joint、Spring、Beam Connection、End Release、Spot Weld、Body Interaction（仅用于显式动力学分析）和 Bearings。仅有 Contact、Joint 和 Mesh Connection 可以自动生成。

1．连接项

连接项（Connections）在树结构图中的位置如图 5-44 所示。其为所有连接类型对象在树结构图的容器，但可以自动生成的 Contact、Joint 和 Mesh Connection 对象除外。这 3 种对象将被放置到被称为“Connection Group”的项中。

如图 5-45 所示，可以对 Connections 的 Generate Automatic Connection On Refresh 和 Transparency 两个属性进行设置。前者在进行设计分析的时候非常有用，应设置为 Yes。

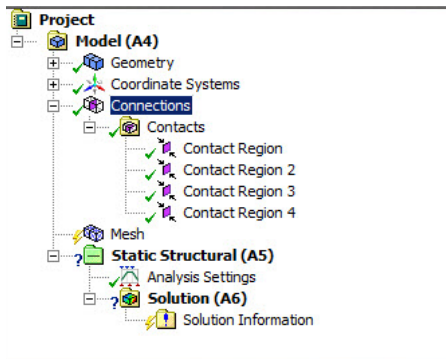


图 5-44　连接项

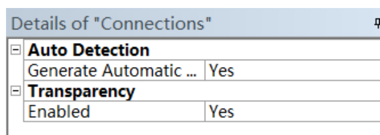


图 5-45　Connection 设置

2．连接工作表

选中 Connections 后，可以在图形窗口区域查看连接工作表的相关内容，这里提供了连接相关数据的细节。

3．接触

设置接触在分析中非常重要，该内容将重点在接触分析章节讲述。

4．连接

连接的类型和设置将在刚体运动分析章节讲述。

5．网格连接

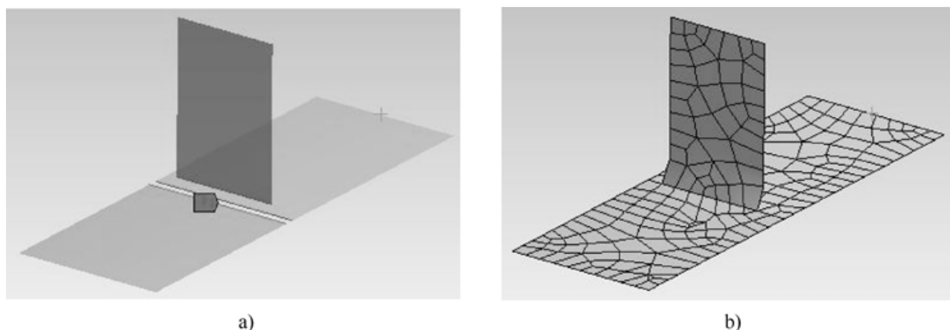
网格连接（Mesh Connection）功能可以帮助连接不连续体之间的网格划分。如图 5−46a 所示的不连续体经过网格连接处理后，划分的网格如图 5−46b 所示。

网格连接一般可用于以下两种情况。

1）边缘到边缘的连接。

2）边缘到面的连接。

为方便进行网格连接操作，可以打开多个窗口查看待连接体的情况。



a)　　　　　　　　　　b)

图 5−46　网格连接

a) 模型　b) 连接后

6．弹簧

弹簧（Spring）对象可以用来模拟弹簧。施加弹簧的方法为：

1）选中 Connections 对象后，选择“Body−Ground”→“Spring”或“Body−Body”→“Spring”引入弹簧对象。

2）设置弹簧细节窗口。

弹簧细节设置窗口如图 5−47 所示，设置的弹簧如图 5−48 所示，仿真计算的结果如图 5−49 所示。

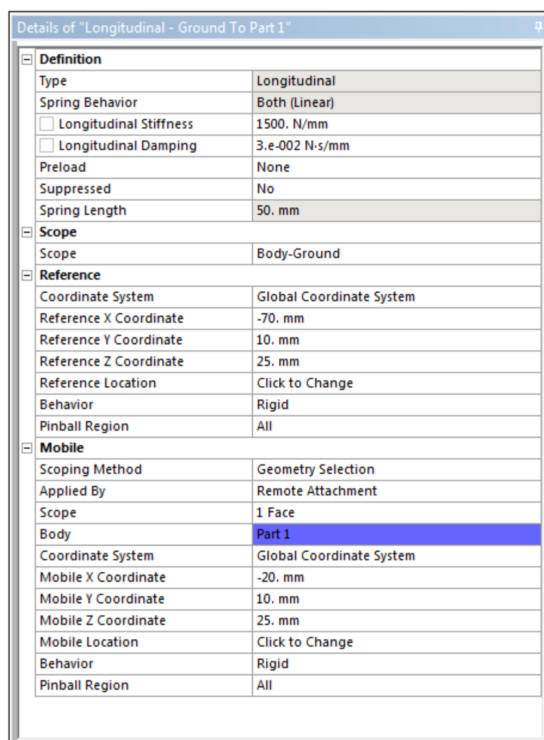
7．梁连接

梁连接 Beam 对象可以用来创建体与体之间及体与地之间的连接。在所有的结构分析中均可以使用梁连接。创建梁连接的方法与创建前面弹簧连接的方法大体相同，这里不再详述。

8．定位焊

定位焊可以用来连接不同的面体零件，从而形成装配，其作用与接触一致。定位焊在不

同的体间传递载荷，使装配能够被分析。



Details of "Longitudinal - Ground To Part 1"

Definition	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both (Linear)
Longitudinal Stiffness	1500. N/mm
Longitudinal Damping	3.e-002 N·s/mm
Preload	None
Suppressed	No
Spring Length	50. mm
Scope	
Scope	Body-Ground
Reference	
Coordinate System	Global Coordinate System
Reference X Coordinate	-70. mm
Reference Y Coordinate	10. mm
Reference Z Coordinate	25. mm
Reference Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Face
Body	Part 1
Coordinate System	Global Coordinate System
Mobile X Coordinate	-20. mm
Mobile Y Coordinate	10. mm
Mobile Z Coordinate	25. mm
Mobile Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All

图 5-47　弹簧细节设置窗口

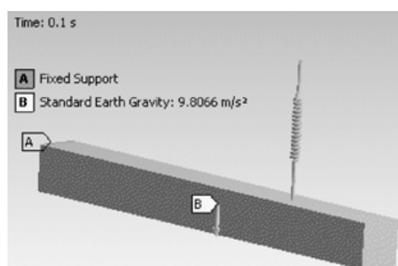


图 5-48　设置的弹簧

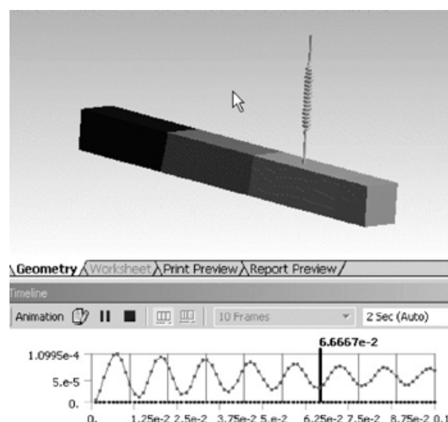


图 5-49　仿真计算的结果

9．轴承

轴承（Bearing）对象在 Mechanical 中为一个二维弹性单元，可用来限制旋转部件的相对运动和转动。定义轴承时，必须设置刚度和阻尼。使用轴承的步骤包括：

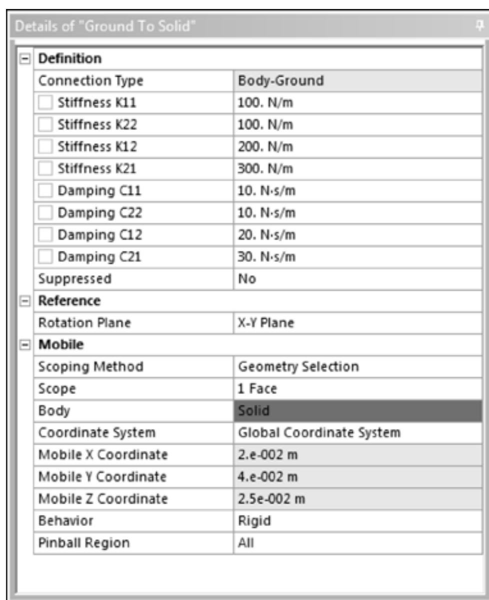
1）选中 Connections 对象后，右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Bearing”，添加 Bearing。

2）设置旋转发生面，可选已定义坐标系的面。

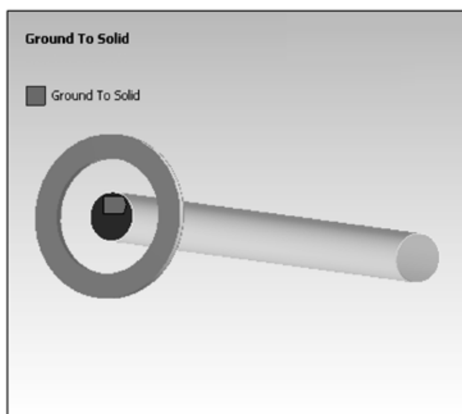
3）设置 Scoping Method，确定轴承的施加位置。

4）可以设置 Behavior 为刚性或柔性。

图 5-50a 所示为轴承设置的细节窗口，图 5-50b 所示为轴承设置结果。



a)



b)

图 5-50　设置轴承

a) 轴承设置的细节窗口　b) 轴承设置结果

5.2.5 分析求解设置

本节的主要内容包括：分析求解通用设置和载荷步设置。相关的内容如下所述。

1．通用设置

对于在 Mechanical 中进行的分析而言，大部分的通用设置将会根据选择的分析类型自动提供。这些选项位于树结构图中 Analysis Settings 对象下。下面对一些常用的设置进行基本的介绍。

（1）载荷步控制　载荷步控制在分析中充当着非常重要的角色。载荷步控制包括两个功能：

1）定义载荷步。

2）设置每个载荷步的分析设置参数。

关于载荷步控制的具体内容将在后文中讲述。

（2）求解器控制　求解器控制的内容根据分析的类型改变，不同分析类型条件下求解器控制的属性情况见表 5-11。

表 5-11　求解器控制属性

细节窗口显示属性	分析系统									
	Static Structural	Transient Structural	Rigid Dynamics	Modal	Linear Buckling	Steady-State Thermal	Transient Thermal	Magnetostatic	Electric	Thermal Electric
Damped				■						
Solver Type	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Mode Reuse				■						
Store Complex Solution				■						
Weak Springs	■	■								
Large Deflection	■	■								
Inertia Relief	■									
Time Integration and Constraint Stabilization			■							
Fracture	■									

注：■为显示属性。

（3）重启分析　在静力结构分析和瞬态结构分析中可以使用重启分析（Restart Analysis）来获得从某时刻重新启动分析所需的数据库。

（4）蠕变控制　在静力结构分析和瞬态结构分析中可以使用蠕变控制来对材料的蠕变效应进行考虑。这在模型承载时间非常长的分析中有必要使用。

（5）循环控制　可以设置循环对称结构在模态分析中获取求解结果的方式。

（6）辐射控制　辐射控制可以在热相关分析中考虑辐射的因素进行控制。

（7）分析相关选项　分析相关选项根据分析的不同而不同。例如，在进行模态分析的时候，设置的求解方法可以为模态叠加法和完全法等。

（8）阻尼控制　在进行动力学分析时，可以设置阻尼。

2．载荷步控制

加载过程中，载荷步、子步和平衡迭代是控制加载求解过程的重要手段，而这些均以 ANSYS Workbench 定义的时间和加载方式为基础。

（1）载荷步、子步和平衡迭代　载荷步、子步和平衡迭代是控制加载求解过程的 3 个载荷时间历程节点。

1）载荷步。载荷步（Step）是可以获取正确求解结果的、由用户直接定义的加载配置的载荷设置间隔，是用户分次输入载荷的结果。

➢ 在线性静态分析或稳态分析中，可以使用不同的载荷步施加不同的载荷组合。例如，在第一个载荷步中施加惯性载荷，在第二个载荷步中施加力载荷，在第三个载荷步中施加力和惯性载荷以及一个不同的位移条件等。图 5-51a 所示为在不同载荷步施加不同载荷的情况。

➢ 在瞬态分析中，可以将多个载荷步加到同一加载历程曲线的不同时间点。图 5−51b 所示为一个需要 3 个载荷步的载荷历程曲线：第一个载荷步用于加载渐变载荷，第二个载荷步用于加载不变载荷，第三个载荷步用于卸载。在每个载荷步的终点，载荷值均达到用户指定的值。

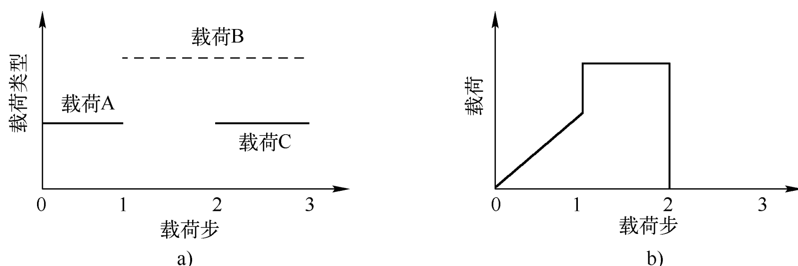


图 5−51　载荷步加载过程

a) 稳态分析加载步骤　b) 瞬态分析加载步骤

2）子步。子步（subStep）是载荷步中载荷逐渐施加到有限元模型上的过程中进行求解的点。图 5−52 所示为瞬态分析加载过程中的载荷步和子步之间的关系。从图中可以看到，在第一个载荷步中，载荷被分成了 3 个子步逐步计算；在第二个载荷步中也是如此；在第三个载荷步中，使用两个子步完成了卸载。

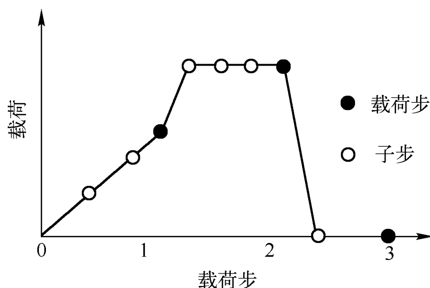


图 5−52　载荷步下的子步

子步对求解过程的控制非常重要，很多时候需要使用不同的子步数来满足不同的加载和求解需要：

➢ 在非线性静态和稳态分析中，使用子步逐渐施加载荷以便能提高求解精确度，甚至使求解结果从不收敛转化为收敛。
➢ 在线性或非线性瞬态分析中，使用子步满足时间步长的需要，得到较为精确的解，即满足瞬态时间累积法则。
➢ 在谐响应分析中，使用子步获得谐响应频率范围内多个频率处的解。

3）平衡迭代。当子步的载荷施加到有限元模型上时，求解器开始求解子步载荷的结果。有限元常使用迭代来求解，在迭代的过程中逐渐逼近子步载荷，使用迭代方程（省略其他变量）可以表示为

$$f(L_n, L_{n-1}, L) = 0$$

式中，L为子步载荷，L_n为第n次迭代的结果，当满足$|L-L_n|<L_{err}$时，停止迭代。L_{err}为残差标准。通常一个子步求解需要经过若干次迭代，每次迭代都被称为一次平衡 迭代。

（2）时间　ANSYS Workbench 对所有的静态和瞬态分析都使用时间作为跟踪参数，即在指定载荷历程时，在每个载荷步的结束点赋予时间值，而不论载荷类型是否依赖于时间。这样，计算的结果将是与时间有关的函数：

1）在静态线性分析中，时间取为常量 0。

2）在瞬态分析中，时间作为表示真实时间历程的变量在变化。

3）在其他分析中，时间仅作为一个计算器，识别求解时所采用的不同载荷步。

另外，时间也可作为一个识别载荷步和载荷子步的跟踪器。从时间历程上讲，载荷步是作用在指定的时间间隔内的一系列载荷；子步是载荷步中的时间点，平衡迭代求取的是子步时间点上的中间解。

使用时间作为跟踪器的优势在于：在所有情况下可以使用一个不变的“跟踪器”对求解历程进行跟踪，而不需要再依赖于具体分析的特殊物理量；而时间是单调增加的，能够代表自然界中发生的现象，因为自然界发生的大多数现象都必定经历一段时间，无论这个时间是多么短暂。

在瞬态分析或率相关的静态分析（如蠕变或粘塑性分析）中，时间跟踪器能具体地代表实际的按年月顺序的时间。在指定载荷历程时，指定每个载荷步的结束点的时间值。在其他分析中，时间作为一个识别载荷步和载荷子步的计数器，是 ANSYS Workbench 内部变量，不再表示具体的时间值。

在后处理中，可以使用时间作为自变量，其他分析量作为因变量来查看时间历程上的结果信息。这时，时间历程上的结果是每一个子步结束时求取的结果。

（3）阶跃载荷和渐变载荷　施加载荷有两种基本方式：阶跃载荷和渐变载荷。前一种方式，载荷被突然施加到对象上；而后一种方式，载荷被缓缓地施加到对象上。

在 ANSYS Workbench 中，载荷步的时间终点的载荷值达到指定的值，根据施加载荷的不同，载荷达到指定值的方式也不同。根据载荷步中载荷达到指定值的时间不同，按以下两种方式定义施加方式不同的载荷：

- 阶跃载荷（Stepped Load）——指定载荷施加于第一个载荷子步，且在载荷步的其余部分载荷保持不变，如图 5-53a 所示。

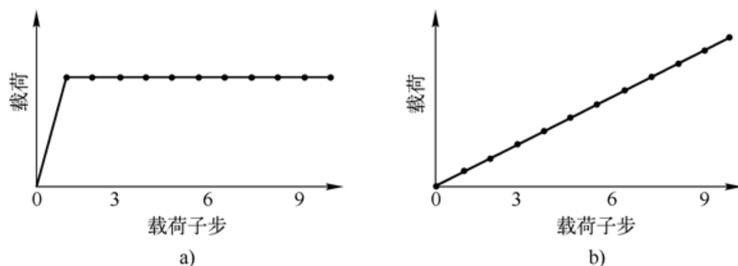


图 5-53　载荷施加方式区别

a) 阶跃载荷　b) 渐变载荷



➢ 渐变载荷（Ramped Load）——在每个载荷子步，载荷值逐渐增加，指定载荷出现在载荷步结束时的最后子步，如图 5-53b 所示。

两种载荷在 ANSYS 中的设置方式如下文所述。

5.2.6 设置边界条件

边界条件包括载荷和支撑，下面对它们的使用方法进行介绍。

1．施加对象选择

可以通过两种方式对施加对象进行选择，如图 5-54 所示。

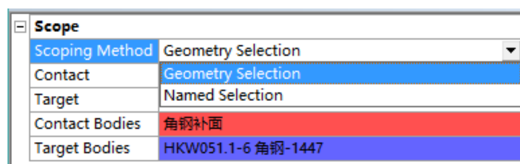


图 5-54 施加对象选择方式

➢ 几何模型选取（Geometry Selection）——选取图形窗口的几何模型。

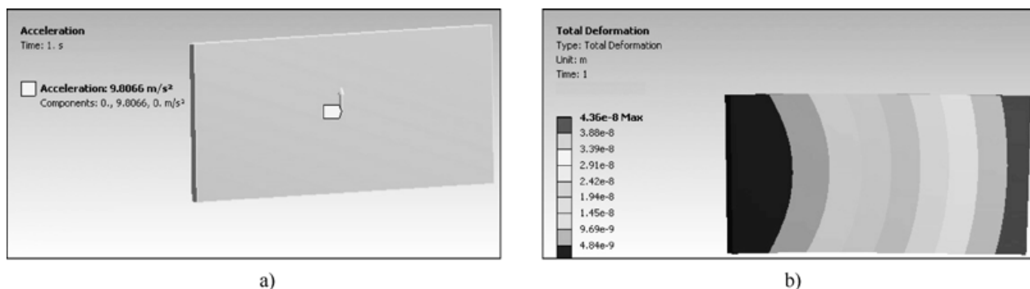
➢ 集合选取（Named Selection）——选取特定对象所代表的几何模型。

2．边界条件类型

边界条件的类型包括：惯性力、载荷、支撑、条件、直接 FE、远端边界条件和导入边界条件。下面对这些边界条件进行介绍。

（1）惯性力 惯性力包括加速度、重力和旋转速度。在设置时应指定作用几何实体和作用方向。图 5-55a 所示为对模型施加加速度，图 5-55b 所示为求解得到的变形情况。注意：变形发生的方向与加速度的方向是相反的。

（2）载荷 载荷根据分析内容的不同而不同，以结构分析为例，常见的载荷包括压力、力、转矩、轴承载荷、螺栓预紧力等。例如，图 5-56a 所示为对模型施加载荷，包括力与螺栓预紧力（预紧力方式）；图 5-56b 所示为对模型施加载荷，包括力与螺栓预紧力（长度调节方式）。



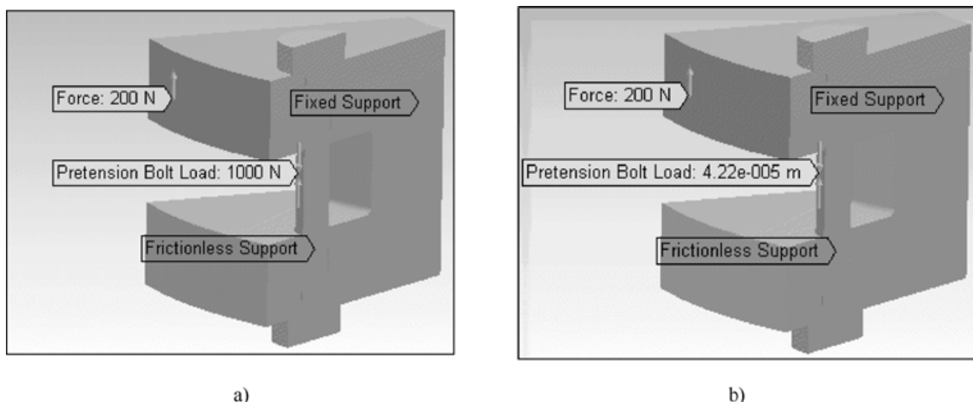
a) b)

图 5-55 加速度作用于结构

a) 施加加速度 b) 变形情况

（3）支撑 常见的支撑类型包括固定支撑、位移、无摩擦面支撑、圆柱支撑、单向简

支、仅可压缩支撑等。支撑的本质在于自由度约束，其选取的类型对分析结果通常有巨大的影响。



a) b)

图 5–56 施加螺栓预紧

a) 螺栓预紧力（预紧力方式） b) 螺栓预紧力（长度调节方式）

（4）条件 在结构分析中常用的条件包括耦合和约束方程。图 5–57 所示为设置了一个约束方程。

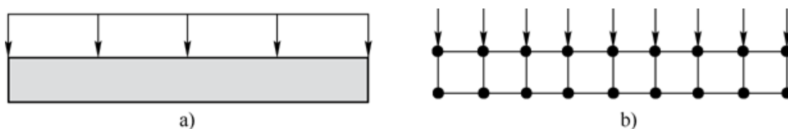
Constraint Equation

7 = 4.1 (1/mm) * Remote Point A(X Displacement) + 1 (1/rad) * Remote Vertex(Rotation Z)

Coefficient	Units	Remote Point	DOF Selection
4.1	1/mm	Remote Point A	X Displacement
1	1/rad	Remote Vertex	Rotation Z

图 5–57 约束方程

（5）直接 FE 边界条件 直接 FE 边界条件不施加在模型上，而直接施加在单元节点上。其与施加在模型上的边界条件的区别如图 5–58 所示。



a) b)

图 5–58 施加在不同对象上的载荷

a) 几何模型载荷 b) FE 载荷

（6）远端边界条件 远端边界条件是作用在远端点上的边界条件，这种边界条件不直接作用在几何模型或 FE 上，其通过远端点与模型的连接进行传递。

（7）导入边界条件 导入边界条件是将其他分析中的结果作为载荷导入到分析中的边界条件。支持导入边界条件的来源系统与使用的分析类型见表 5–12。

表 5-12 导入边界条件

传递数据	来源系统	使用的分析类型
对流	CFD	Steady State Thermal, Transient Thermal, Thermal-Electric
压力	CFD	Static Structural, Transient Structural
温度	CFD	Steady State Thermal, Transient Thermal, Thermal-Electric, Static Structural, Transient Structural
热流量、对流、温度	System Coupling	Steady State Thermal
焦耳热	Electric	Steady State Thermal, Transient Thermal
力密度	Electromagnetic	Static Structural, Transient Structural
功率损失密度	Electromagnetic	Steady State Thermal, Transient Thermal
力和转矩	Electromagnetic	Harmonic Response
位移、力、温度、应变、应力、体力密度	External Files	Static Structural, Transient Structural
热流量、对流、温度、热生成量	External Files	Steady State Thermal, Transient Thermal, Thermal-Electric
压力	External Files	Static Structural, Transient Structural, Harmonic Response
速度	External Files	Acoustic Analysis
速度	Harmonic Response	Acoustic Analysis
温度	Polyflow	Steady State Thermal, Transient Thermal, Thermal-Electric, Static Structural, Transient Structural
位移、温度	Static Structural, Transient Structural	Static Structural, Transient Structural
温度	Steady-State Thermal,Transient Thermal	Static Structural, Transient Structural, Electric
温度	Thermal-Electric	Static Structural, Transient Structural

3．空间载荷与位移

空间载荷与位移是指所施加的载荷与位移随着空间位置的变化而发生变化，其施加时需要通过表格或函数定义载荷或位移随空间位置的变化细节。图 5-59 所示为定义了一个随着 *x* 坐标值增大而增大的空间压力载荷。

4．定义边界条件幅值

边界条件幅值可以通过以下 3 种方式进行定义：

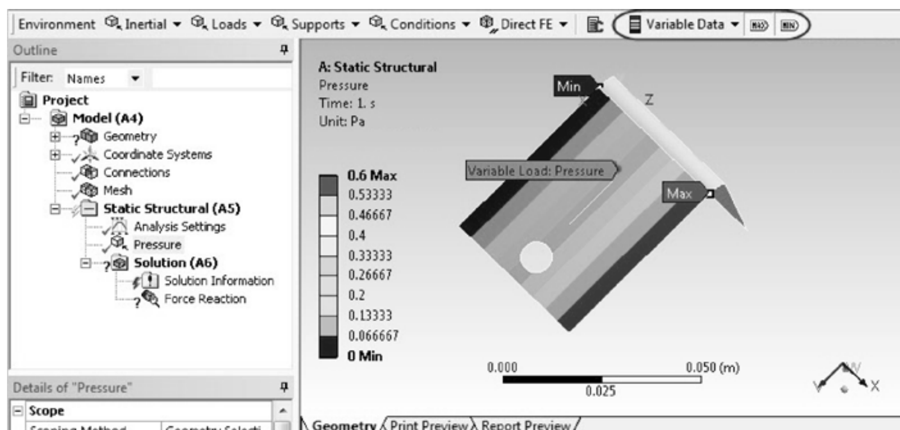


图 5-59 空间压力载荷

1）常量：可以为静态值或表达式。

2）表格载荷：可以定义随时间、频率或空间位置变化的载荷。

3）函数载荷：可以定义随时间或空间位置变化的载荷。

5.2.7 结果处理

结果处理是进行有限元分析非常关键的一步，对结果进行有效的处理可以明白分析模型的响应情况。

ANSYS Workbench提供了丰富的结果处理手段来对结果进行处理。例如，等值线云图、向量图、粒子流向图、路径图、断面图等，还可对结果自动建立历程曲线和表格。图 5−60 和图 5−61所示为两 种常见的结果显示方式。

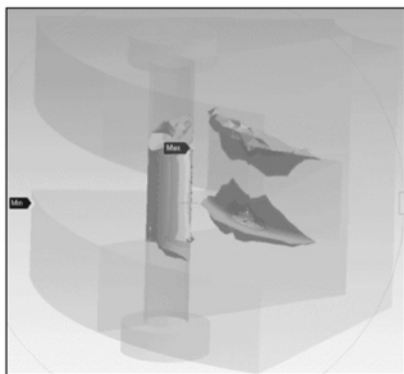


图 5−60　等值线云图

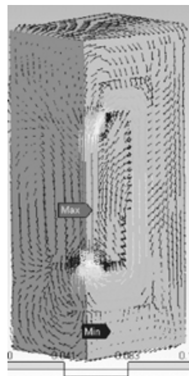


图 5−61　向量图

除此之外，ANSYS Workbench 还可以对模型中的结果使用 Probe 进行查询和使用工作表查看求解总结（图 5−62）。获得了结果以后，还可以对结果进行进一步的处理，包括生成动画、形成报告等。图 5−63 所示为对结果进行动画处理的界面，单击▶便可生成动画。

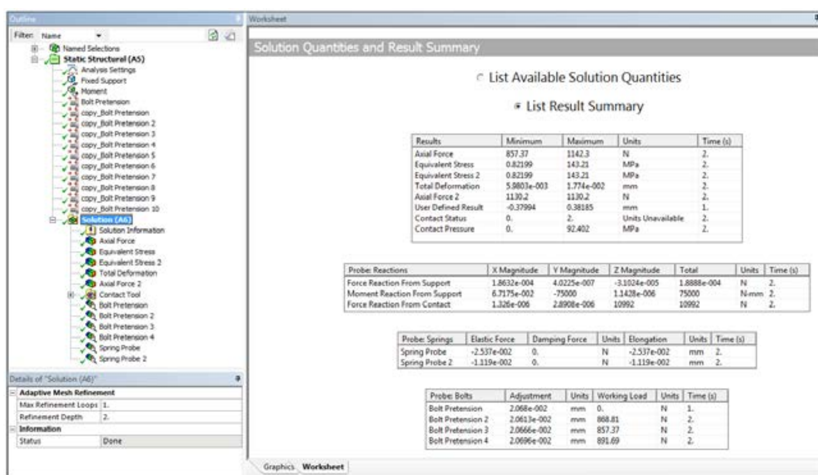


图 5−62　工作表



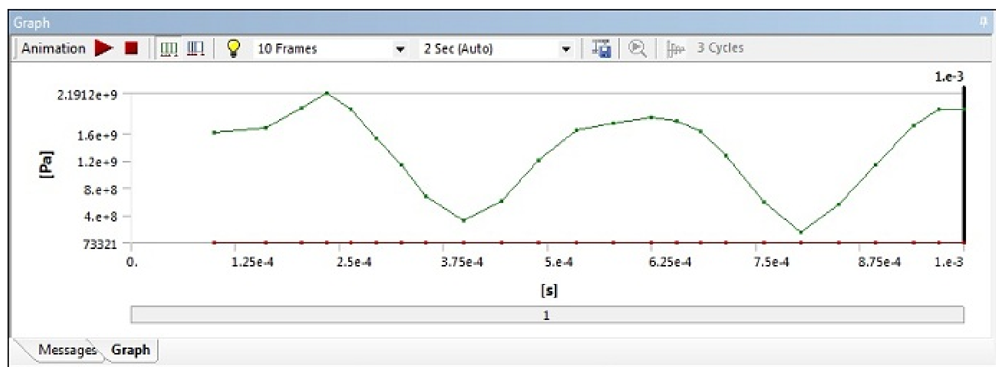


图 5-63　生成动画界面

5.3　本章小结

本章介绍了 Mechanical 应用的基本内容，包括软件使用基础和进行分析使用的基础。使用 ANSYS Workbench 进行有限元分析，大部分的情况下都要用到 Mechanical，因此学习好本章内容对使用 Workbench 具有非常重要的意义。然而，Mechanical 的使用非常具体，本章未能涉及非常具体的细节，希望用户在使用过程中多查阅帮助文件以掌握操作细节。



第 6 章　线性静力分析

线性静力分析是使用 ANSYS Workbench 进行结构分析中最简单的一种分析。线性静力学分析理论简单、操作容易，本书将其作为学习使用 ANSYS Workbench 进行有限元分析操作的入门。本章将要介绍的内容包括线性静力分析的基本概念、操作流程和分析示例。

学习目标：

- 理解进行线性静力分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行线性静力分析。

6.1　线性静力分析概述

假设材料、结构和对象的状态均为线性，则模型载荷与变形直接呈现线性变化的关系，满足这样条件的分析可以称为线性分析。

在线性材料方面，线性静力学分析涉及的内容主要包括：线性材料的应力–应变关系、各向异性线性材料和热膨胀。下文将介绍这些内容。

6.1.1 应力–应变关系

线性材料的应力–应变关系满足：

$$\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon^{el}\}$$

式中　$\{\sigma\}$——材料应变向量，如图 6–1 所示。使用各个组成量可以表示为：

$$\{\sigma\}=[\sigma_x,\sigma_y,\sigma_z,\sigma_{xy},\sigma_{yz},\sigma_{xz}]^{\mathrm{T}}$$

$[D]$——材料刚度矩阵；

$\{\varepsilon^{el}\}$——材料弹性应变，包括两个部分，一部分为由力载荷引起的普通应变$\{\varepsilon\}$，另一部分为稳定引起的热膨胀$\{\varepsilon^{th}\}$，热膨胀满足：

$$\{\varepsilon^{th}\}=\Delta T[\alpha_x^{se},\alpha_y^{se},\alpha_z^{se},0,0,0]$$

其中，ΔT 为相对参考温度稳定的温差，$\Delta T=T-T_0$； α 为各向热膨胀系数。

材料的应力–应变关系又可以用下式来表示：

$$\{\varepsilon\}=\{\varepsilon^{th}\}+[D]^{-1}\{\sigma\}$$

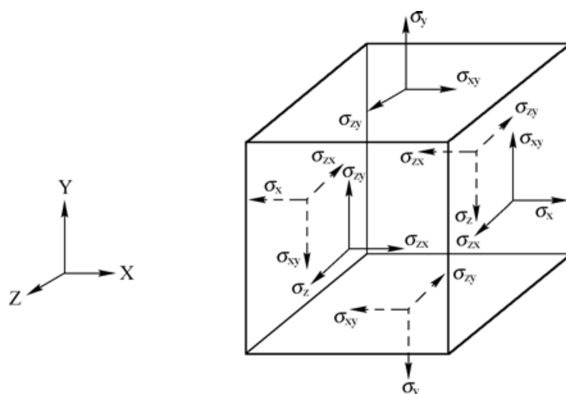


图 6-1　各向应力示意图

式中，挠度矩阵 $\boldsymbol{D}^{-1}$ 满足下式：

$$\boldsymbol{D}^{-1}=\begin{pmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{pmatrix}$$

挠度矩阵 $\boldsymbol{D}^{-1}$ 假设为对称矩阵，即

$$\begin{cases} \nu_{xy}/E_x=\nu_{yx}/E_y \\ \nu_{xz}/E_x=\nu_{zx}/E_z \\ \nu_{yz}/E_y=\nu_{yz}/E_y \end{cases}$$

因此，各个方向上的泊松比 ν 并不彼此相互独立。同时，进行分析时需要指定不同方向上的泊松比 ν_{xy}、ν_{xz}、ν_{yz} 或 ν_{yx}、ν_{zx}、ν_{yz}。

对于各向同性材料，在没有输入切变模量的情况下，程序会默认采用下式计算切变模量：

$$G_{xy}=G_{yz}=G_{xz}=\frac{E_x}{2(1+\nu_{xy})}$$

而对于各向正交异性材料，需要首先查实切变模量的大小，然后输入到程序中，因为程序并不默认对各向正交异性材料求取切变模量。

注意：为了正确进行求解，材料刚度矩阵 $\boldsymbol{D}$ 必须为正定矩阵。在进行分析求解的时候，程序自动检查材料刚度矩阵 $\boldsymbol{D}$，如果发现其不是正定矩阵，将不能进行正确的求解。但在与温度相关材料中，程序在第一个载荷步开始时，使用一定温度下的材料特性对刚度矩阵 $\boldsymbol{D}$ 进行检查。不过使用各向同性材料不用担心矩阵的正定性，因为其总是正定的。

通过前面的几个式子就可以求出受力状态下，材料的应变和切变以及正应力和切应力。

6.1.2 轴对称模型下的各向异性线性材料

各向异性是指在不同的方向材料有不同的物理特性，图 6–2 所示是各向异性材料物理性质的示意图。在不同的坐标系中，各向异性材料表示的方法不同，如图 6–3 所示，显示了在两种坐标系下的材料特性。

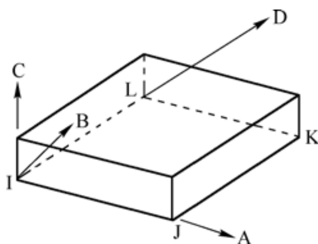


图 6–2 各向异性材料

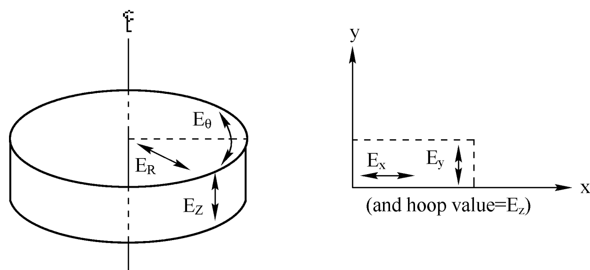


图 6–3 材料特性在不同坐标系中的表现形式

需要注意的是，在不同的坐标系下需要转化材料特性数据。例如，从轴对称下的圆柱坐标系中将材料特性数据转换到正交坐标系下时，刚度矩阵在正交坐标系和圆柱坐标系下分别为：

$$\boldsymbol{D}_{x-y-z}{}^{-1}=\begin{pmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}_{R-\theta-z}{}^{-1}=\begin{pmatrix} 1/E_R & -\nu_{Rz}/E_R & -\nu_{R\theta}/E_R \\ -\nu_{zR}/E_z & 1/E_z & -\nu_{\theta z}/E_\theta \\ -\nu_{\theta R}/E_\theta & -\nu_{z\theta}/E_z & 1/E_\theta \end{pmatrix}$$

比较两个矩阵的参数，可以得到：

$$\begin{cases} E_x = E_R \\ E_y = E_z \\ E_z = E_\theta \\ \nu_{xy} = \nu_{Rz} \\ \nu_{yz} = \nu_{z\theta} \\ \nu_{xz} = \nu_{R\theta} \end{cases}$$

6.1.3 热膨胀系数

热膨胀系数由下式求取：

$$\varepsilon^{th} = \alpha^{se}(T - T_0)$$

式中 T——发生热膨胀时的温度；

T_0——参考温度。

6.2 线性静力分析过程

6.2.1 过程概览

线性静力分析操作的基本过程包括：

1）创建分析项目。通过 ANSYS Workbench 左侧的工具箱向项目工程图区域中添加并组合系统。

2）定义材料数据。通过项目工程图中的工程数据（Engineering Data）项定义项目所需的材料数据。

3）添加几何模型。通过导入方式或使用 DM 建模，或两者综合应用，来提供分析项目所需的合适的模型。

4）定义零件行为。主要包括为零件分配材料，定义刚度特性等。

5）定义连接。主要包括定义接触、联接（如轴承、转动关节、弹簧、定位焊等）。

6）划分网格。主要包括设置全局网格划分控制选项和局部网格划分控制选项，并划分网格。

7）设置分析选项。主要设置分析中的载荷、分析选项等。

8）定义初始条件。可以通过已有的分析结果向现有模型添加初始条件。

9）定义边界条件。包括设置载荷和约束。

10）求解。调用合适的求解器进行求解，并在 Mechanical 中同步更新求解过程信息。

11）查看结果。可选择查看应力、应变、变形等结果，并将结果进行处理以满足使用需要。该步骤的部分内容可以放在步骤 11）前进行设置。

12）保存并退出。

可以将上面的步骤分为 3 类，分别为：

1）前处理。步骤 1）～9)，为有限元分析操作的重点所在。

2）求解。步骤 10)，基本无需用户参与的过程，但在求解中出现错误时应注意查看求解信息。

3）后处理。步骤 11）～12)，分析和保存求解结果。

下面进一步介绍其中需要重点关注的内容。

6.2.2 结果处理

结果处理的相关工具栏包括：

1）求解结果设置工具栏，是选取和设置求解结果最重要的途径，如图 6–4 所示。

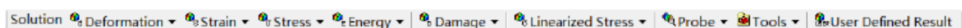


图 6–4　求解结果设置工具栏

2）结果显示工具栏如图 6–5 所示。



图 6–5　结果显示工具栏

结果设置工具栏提供的求解结果类型包括如下内容。

1．变形

“Deformation”命令提供变形结果，包括合位移结果和方向位移结果。如图 6–6 所示，合位移结果为U，各方向位移包括U_X、U_Y和U_Z。

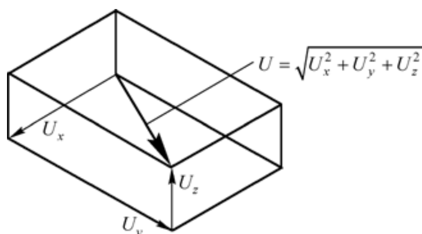


图 6–6 变形结果示意图

2．应力和应变

“Strain”命令提供应变分析结果，“Stress”命令提供应力分析结果，常用的结果包括：

1）等效应力，定义为：

$$\sigma_e=\left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}\right]^{1/2}$$

2）等效应变，定义为：

$$\varepsilon_e=\frac{1}{1+\nu'}\left\{\frac{1}{2}\left[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2\right]\right\}^{1/2}$$

其中，ν'为泊松比。

3）各方向主应力，主应变可以参考图 6–7 所示。其中σ_1为最大应力方向，σ_2为中间应力方向，σ_3为最小应力方向。

4）最大剪切应力τ_{max}如图 6–8 所示。

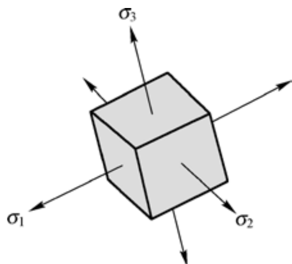


图 6–7 主应力示意图

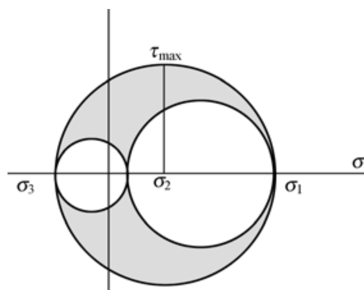


图 6–8 最大剪切应力示意图

5）应力密度，定义为：

$$\sigma_1=\max(|\sigma_1-\sigma_2|,\ |\sigma_2-\sigma_3|,\ |\sigma_3-\sigma_1|)$$

6）最大弹性应变，定义为：

$$\sigma_1=\max(|\sigma_1-\sigma_2|,\ |\sigma_2-\sigma_3|,\ |\sigma_3-\sigma_1|)$$

7）膜应力，定义为：

$$\sigma_{11}^{m} = \frac{1}{t}\int_{0}^{t}\sigma_{11}(z)\mathrm{d}z$$

$$\sigma_{22}^{m} = \frac{1}{t}\int_{0}^{t}\sigma_{22}(z)\mathrm{d}z$$

$$\sigma_{12}^{m} = \frac{1}{t}\int_{0}^{t}\sigma_{12}(z)\mathrm{d}z$$

其中，t 为厚度。

8）弯曲应力，定义为

$$\sigma_{11}^{b} = \frac{6}{t^2}\int_{0}^{t}\sigma_{11}(z)\left(\frac{t}{2-z}\right)\mathrm{d}z$$

$$\sigma_{22}^{b} = \frac{6}{t^2}\int_{0}^{t}\sigma_{22}(z)\left(\frac{t}{2-z}\right)\mathrm{d}z$$

$$\sigma_{12}^{b} = \frac{6}{t^2}\int_{0}^{t}\sigma_{12}(z)\left(\frac{t}{2-z}\right)\mathrm{d}z$$

3．应变能

应变能由 Energy 菜单中的命令提供，反映由于变形在结构中积储的能量。

4．应力工具

应力工具由 Tools 菜单下的 Stress Tools 提供，主要提供应力安全分析显示功能。

5．结果探测

结果探测由 Probe 菜单下的命令提供，可提供几乎所有可设置结果的探测。

6.3　线性静力分析示例

本节将通过对风力发电机的叶片结构分析让读者掌握线性静态结构分析的基本过程，示例的模型已经建好，在进行分析时直接导入即可。

6.3.1　问题描述

图 6-9 所示为一长为 4500mm的风力发电机叶片，叶片厚度为 20mm，其中叶片根端固定，压力面承受 20Pa风压，请对其进行结构分析，求出其应力、应变以及挠度、疲劳特性等参数。

材料：选择系统默认的不锈钢材料及自定义铝合金材料进行分析，其中铝合金材料特性为：弹性模量E：75×10^3 MPa、泊松比μ：0.25、密度DENS：2.7g/cm^3。

模型：char05-01.iges。



图 6-9　模型文件

6.3.2 建立分析项目

步骤01 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

步骤02 在 ANSYS Workbench 主界面中选择“Units”（单位）→“Metric（kg,m,s,℃,A,N,V）”命令，设置模型单位，如图 6-10 所示。

步骤03 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的“Component Systems”→“Geometry”（几何体）选项，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 6-11 所示。

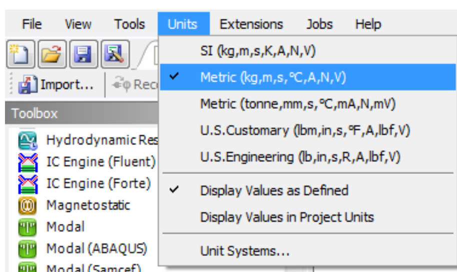


图 6-10 设置单位

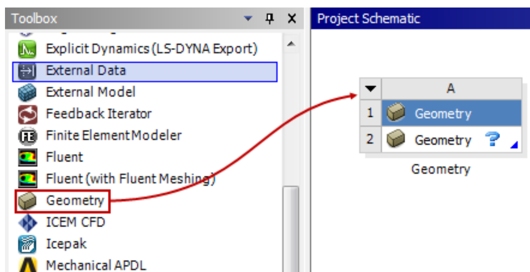


图 6-11 创建分析项目 A

步骤04 在工具箱中的“Analysis Systems”→“Static Structural”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Geometry”呈红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B，此时相关联的数据可共享，如图 6-12 所示。

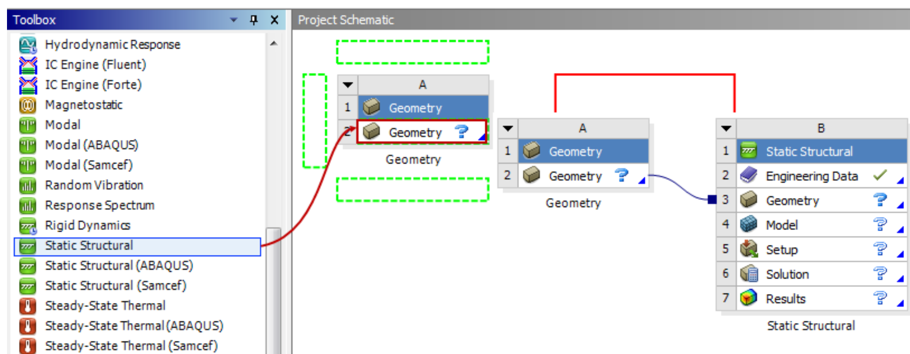


图 6-12 创建分析项目 B



本例是线性静力结构分析，创建项目时可直接创建项目B，而不必创建项目A，几何体的导入可在项目B中的B3 栏“Geometry”中创建。本例的创建方法在对同一模型进行不同的分析时会经常用到。

6.3.3 导入几何体

步骤01 在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”命令，如图 6-13 所示，此时会弹出“打开”对话框。



步骤02 在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“char05-01.iges”几何体文件，如图 6-14 所示，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

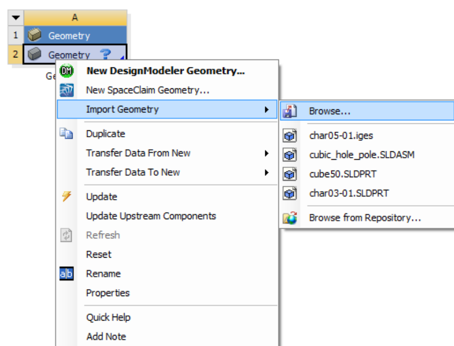


图 6-13 导入几何体

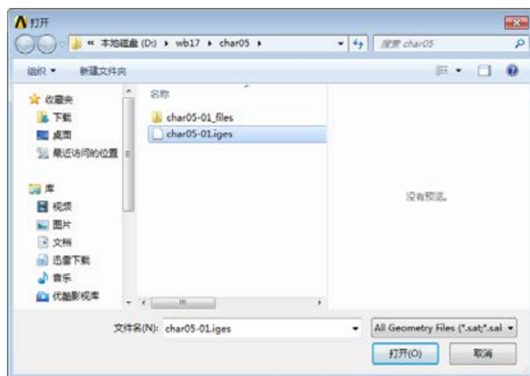


图 6-14 “打开”对话框

步骤03 双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，此时会进入到 DM 界面，设计树中“Import1”前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 6-15 所示。

步骤04 单击 ⚡Generate （生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 6-16 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

步骤05 单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮 ✕ ，退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

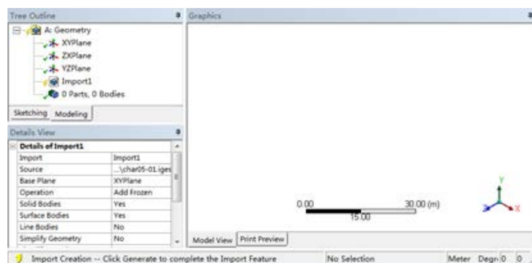


图 6-15 生成前的 DM 界面

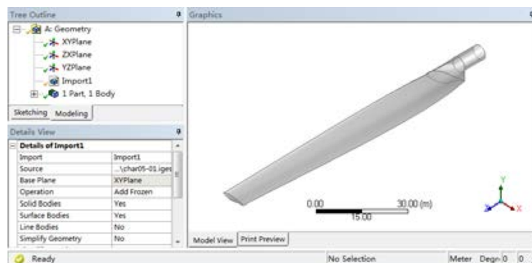


图 6-16 生成后的 DM 界面

6.3.4 添加材料库

1．在材料库中添加不锈钢材料

步骤01 双击项目 B 中的 B2 栏“Engineering Data”项，进入如图 6-17 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

步骤02 在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 6-18 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2: Engineering Data 消失，取代以 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites。

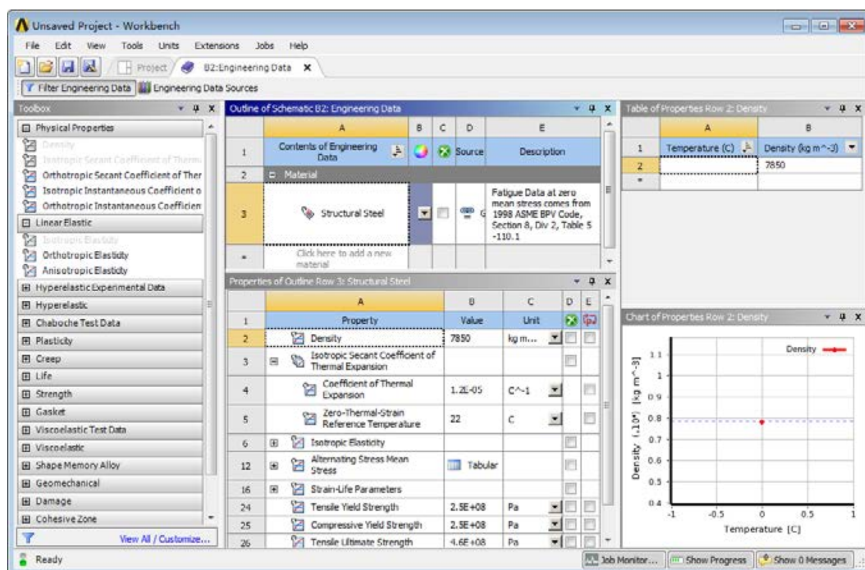


图 6-17　材料参数设置界面（一）

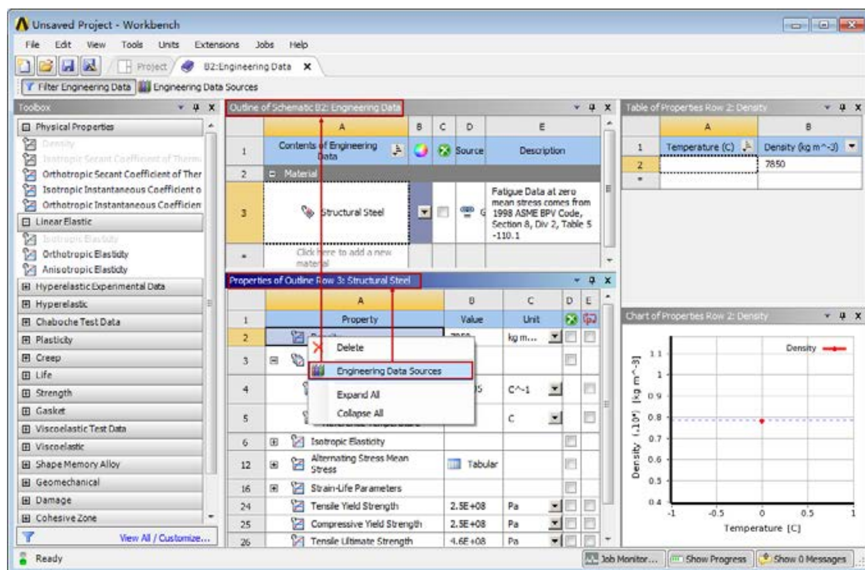


图 6-18　材料参数设置界面（二）

步骤 03　在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏“General Materials”，然后单击 Outline of General Materials 表中 B12 栏的“添加”按钮 ，此时在 C12 栏中会显示 （使用中的）标识，如图 6-19 所示，表示材料添加成功。

步骤 04　同步骤 02，在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”命令，返回到初始界面中。

步骤 05　根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 6-20 所示，本示例采用的是默认值。

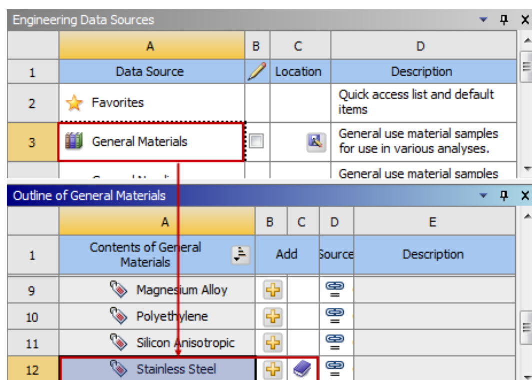


图 6-19　添加材料

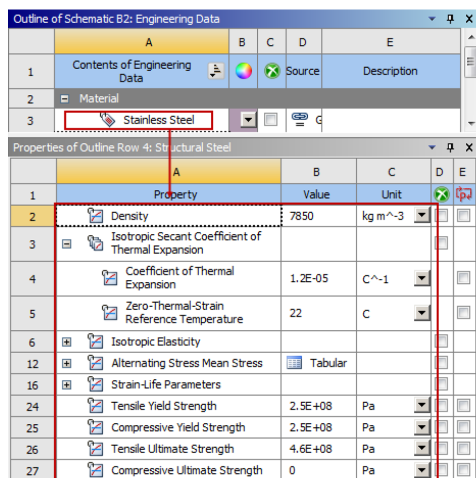


图 6-20　材料参数修改窗口

步骤 06　利用同样的方法将 Structural Steel（结构钢）添加到模型材料库中。

2．在材料库中自定义铝合金材料

步骤 01　在材料参数设置界面下单击 Outline of Schematic B2: Engineering Data 下的 A*栏（Click here to add a new material），命名材料名称为“User Material”，如图 6-21 所示，按〈Enter〉键，创建新材料，此时材料名称前显示为 ，表明材料没有任何参数。

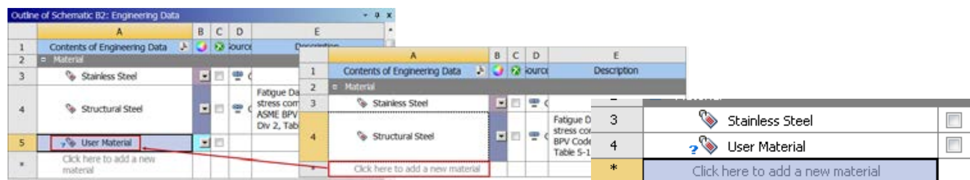


图 6-21　命名材料

步骤 02　为材料添加属性：选中刚刚创建的“ User Material”材料，双击窗口左侧材料属性工具箱（Toolbox）中⊟ Physical Properties（物理特性）下的 Density（密度），如图 6-22 所示，此时会将材料特性添加到 Properties of Outline Row 4: User Material 下。

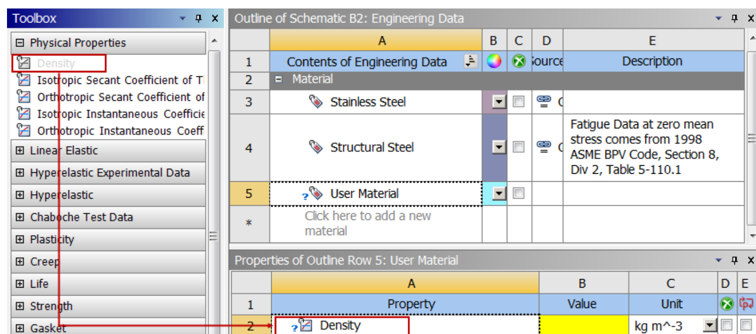


图 6-22　添加材料属性

步骤03 利用同样的方法，双击窗口左侧材料属性工具箱（Toolbox）中⊟ Linear Elastic（线弹性）下的 Isotropic Elasticity，此时会将材料特性添加到 Properties of Outline Row 4: User Material 下，如图 6-23 所示。

Properties of Outline Row 5: User Material

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density		kg m^-3		
3	⊟ Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young'...			
5	Young's Modulus		Pa		
6	Poisson's Ratio				
7	Bulk Modulus		Pa		
8	Shear Modulus		Pa		

图 6-23 添加材料特性

步骤04 在 Properties of Outline Row 4: User Material 中的 B4 栏的下拉列表中选择“Young's Modulus and Poisson's Ratio”（弹性模量及泊松比），该选项为默认选项，如图 6-24 所示。

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density		kg m^-3		
3	⊟ Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Mod...			
5	Young's Modulus	Young's Modulus and Poisson's Ratio	Pa		
6	Poisson's Ratio	Shear Modulus and Poisson's Ratio			
7	Bulk Modulus	Bulk Modulus and Poisson's Ratio Shear Modulus and Young's Modulus	Pa		
8	Shear Modulus	Bulk Modulus and Young's Modulus Bulk Modulus and Shear Modulus	Pa		

图 6-24 设置材料特性为弹性模量及泊松比

步骤05 在显示为黄色的区域输入材料参数值，其中弹性模量E为 75×10^3 Mpa，泊松比μ为 0.25，密度DENS为 2.7g/cm^3，如图 6-25 所示。

Properties of Outline Row 5: User Material

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density		kg m^-3		
3	⊟ Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young'...			
5	Young's Modulu	Young's Modulus and Poisson's Ratio	Pa		
6	Poisson's Ratio	Shear Modulus and Poisson's Ratio Bulk Modulus and Poisson's Ratio			
7	Bulk Modulus	Shear Modulus and Young's Modulus	Pa		
8	Shear Modulus	Bulk Modulus and Young's Modulus Bulk Modulus and Shear Modulus	Pa		

图 6-25 设置材料特性参数值

步骤06 为材料添加疲劳属性：选中“ User Material”材料，双击窗口左侧材料属性工具箱（Toolbox）中⊟ Life（寿命特性）下的 Alternating Stress R-Ratio，此时会将材料特性添加到 Properties of Outline Row 5: User Material 下，如图 6-26 所示。

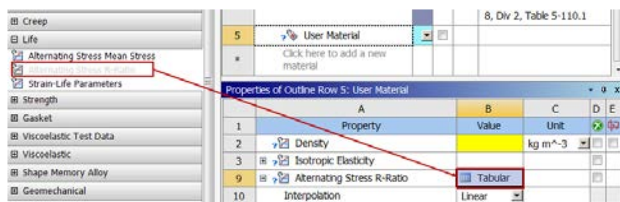


图 6-26 添加疲劳材料特性

步骤07 在 B9 栏下选择“Tabular”，然后在 Table of Properties Row 9:Alternating Stress R-Ratio 的列表中输入疲劳参数值，如图 6-27 所示，疲劳曲线如图 6-28 所示。

Table of Properties Row 9: Alternating Stress R-Ratio

	A
1	R-Ratio
2	-1
*	

	B	C
1	Cycles	Alternating Stress (MPa)
2	1	280
3	10	250
4	1000	230
5	10000	200
6	20000	160
7	50000	140
8	1E+05	120
9	2E+05	100
10	5E+05	90
11	1E+06	80
12	1E+07	60
*		

图 6-27 输入疲劳参数值

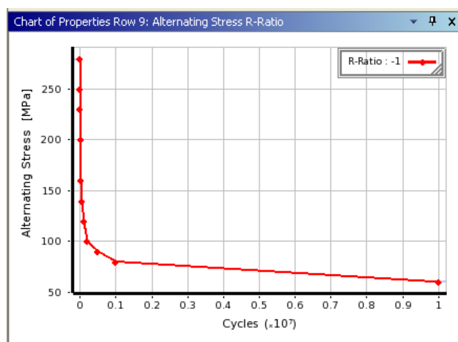


图 6-28 疲劳曲线

步骤08 单击工具栏中的 Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

6.3.5 添加模型材料属性

步骤01 双击项目 B 中的 B4 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作，如图 6-29 所示。

步骤02 在 Mechanical 界面中选择“Units”（单位）→“Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）”命令，设置分析单位，如图 6-30 所示。


技巧提示

此时分析树中“Geometry”前显示的为问号?，表示数据不完全，需要输入完整的数据。

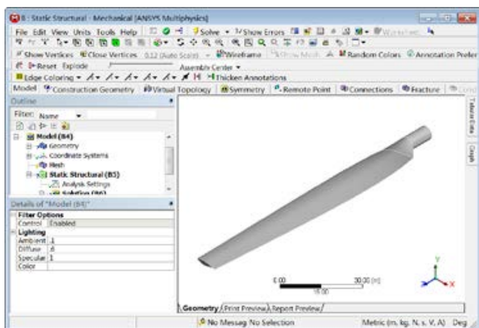


图 6-29 Mechanical 界面

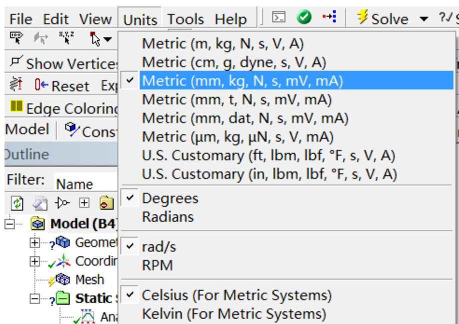


图 6-30 设置分析单位

步骤03 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中“Geometry”选项下的“Surface Body”，此时即可在 Details of “Surface Body”（参数列表）中添加厚度为“20mm”、材料为“Stainless Steel”的模型，如图 6-31 所示。此时分析树中“Geometry”前的?变为✔，如图 6-32 所示，表示参数已经设置完成。

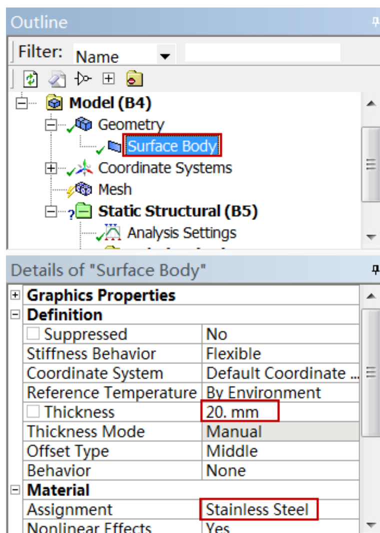


图 6-31 添加材料

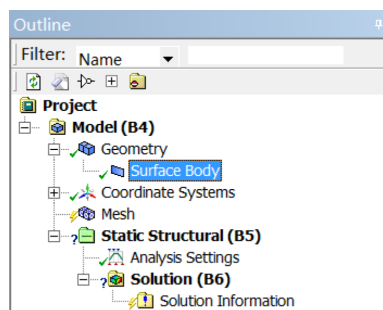


图 6-32 添加材料后的分析树



在后面的分析中单击参数列表中“Material”下“Assignment”黄色区域后的▸按钮，会出现刚刚设置的铝合金材料，选中后即可将其添加到模型中去。

6.3.6 划分网格

步骤01 选中分析树中的“Mesh”项，选择 Mesh 工具栏中“Mesh Control”（网格控制）→“Sizing”（尺寸）命令，为网格划分添加尺寸控制，如图 6-33 所示，此时会在分析树中出现如图 6-34 所示的“Sizing”项。

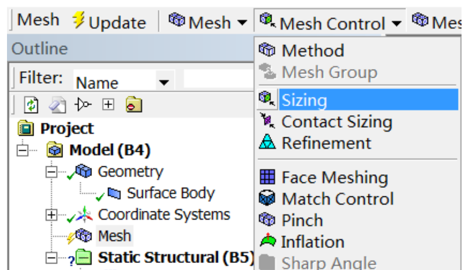


图 6-33 添加尺寸控制

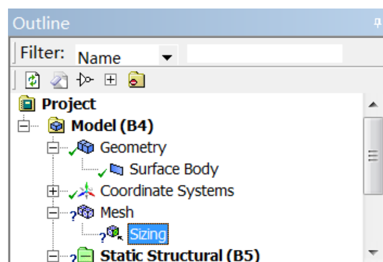


图 6-34 分析树

步骤02 单击图形工具栏中选择模式下的 Box Select（框选）按钮，如图 6-35 所示，然后再单击“选择边”按钮。

步骤 03 在图形窗口中选择如图 6-36 所示的边，在参数设置列表中单击“Geometry”后的 Apply 按钮，完成边的选择，设置“Element Size”为“1mm”，如图 6-37 所示。

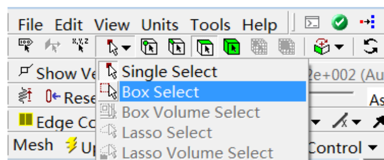


图 6-35 图形工具栏

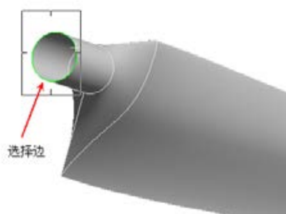


图 6-36 选择边

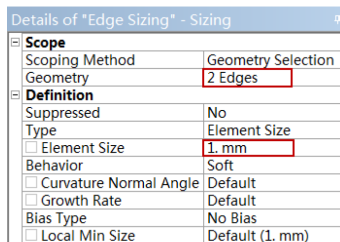


图 6-37 设置参数

步骤 04 如图 6-38 所示，选择分析树中的“Mesh”项，单击 Mesh 工具栏中“Mesh Control”（网格控制）→“Mapped Face Meshing”（绘制面网格）命令，为网格划分添加面网格控制，此时的设计树如图 6-39 所示。

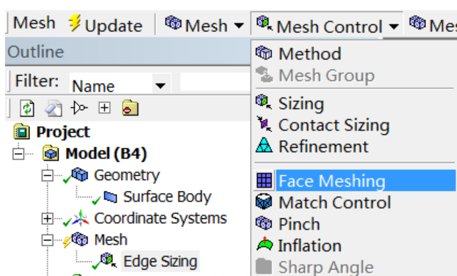


图 6-38 添加面网格控制

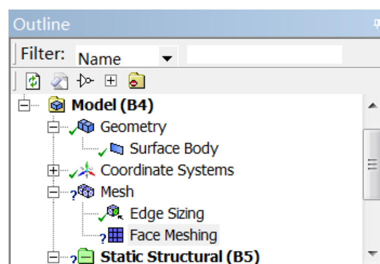


图 6-39 设计树选择

步骤 05 单击图形工具栏中的选择模式下的 Single Select（点选）按钮，然后再单击“选择面”按钮，选择时按住〈Ctrl〉键，连续单击选择如图 6-40 所示的所有 6 个面。



在选择时，可以根据需要按住鼠标中键适当调整视图，以方便查看。

步骤 06 在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成面的选择，设置“Method”为“Quadrilaterals”（四边形）网格，如图 6-41 所示。



图 6-40 选择面

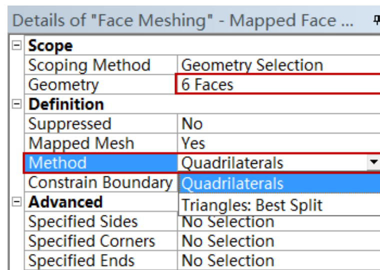


图 6-41 设置参数

步骤 07　在 Outline（分析树）中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，此时会弹出如图 6-42 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 6-43 所示。

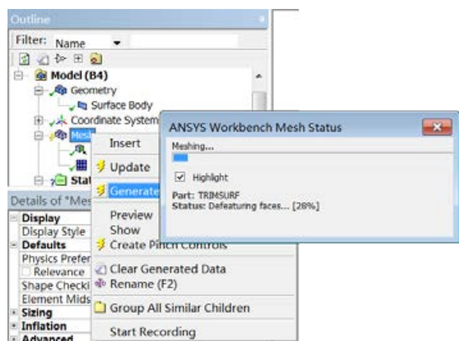


图 6-42　进度显示条

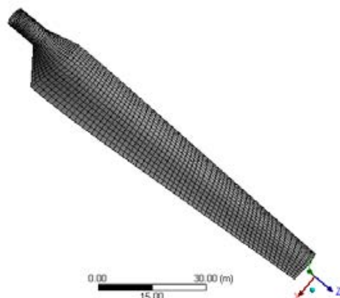


图 6-43　网格效果

6.3.7　施加载荷与约束

1．施加固定约束

步骤 01　选中分析树中的“Static Structural（B5）”项，单击 Environment 工具栏中“Supports”（约束）→“Fixed Support”（固定约束）命令，为模型添加约束，如图 6-44 所示。

步骤 02　单击图形工具栏中选择模式下的 Box Select（框选）按钮，然后再单击“选择边”按钮。

步骤 03　在图形窗口中选择如图 6-45 所示的边，在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成边的选择。

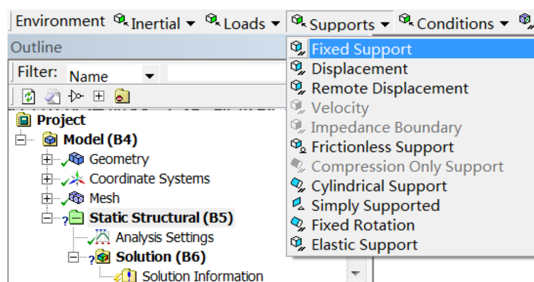


图 6-44　添加约束

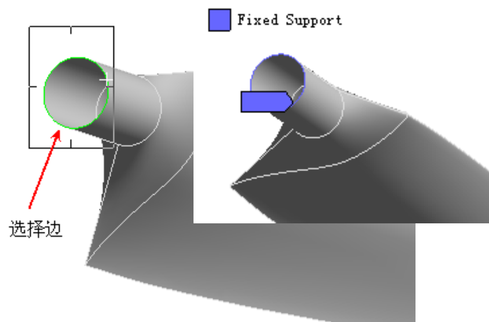


图 6-45　选择边

2．在压力面上施加压力

步骤 01　单击 Environment 工具栏中的“Loads”（载荷）→“Pressure”（压力）命令，为模型施加压力，如图 6-46 所示。

步骤 02　单击图形工具栏中选择模式下的“Single Select”（点选）按钮，然后再单击“选择

面”按钮，选择如图 6-47 所示的面。

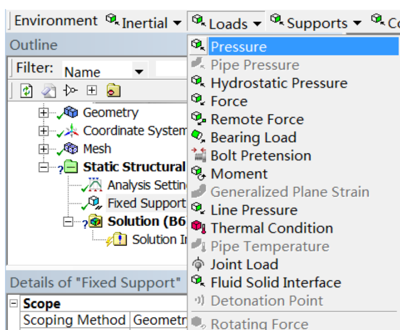


图 6-46　施加压力

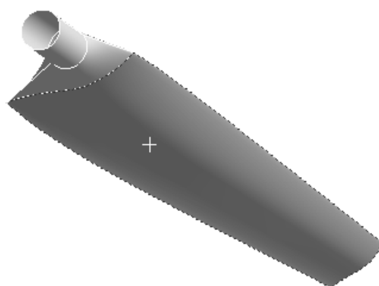
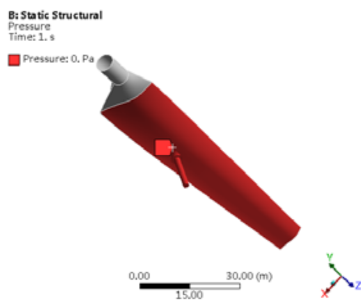


图 6-47　选择面

步骤 03　在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成面的选择，设置“Magnitude”为 2.e-005Pa，此时选择的面变得如图 6-48 所示。



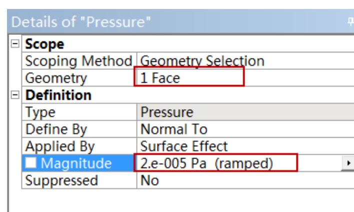


图 6-48　施加载荷后的面

6.3.8　结果后处理

步骤 01　选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项，此时会出现如图 6-49 所示的 Solution 工具栏。

步骤 02　求解等效应力：选择 Solution 工具栏中的“Stress”（应力）→“Equivalent（von-Mises）”命令，如图 6-50 所示，此时在分析树中会出现“Equivalent Stress”（等效应力）选项。

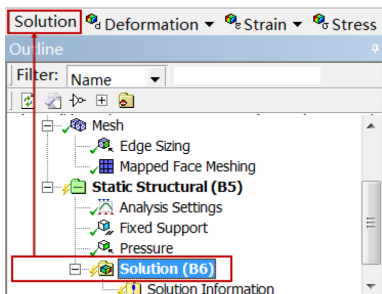


图 6-49　Solution 工具栏

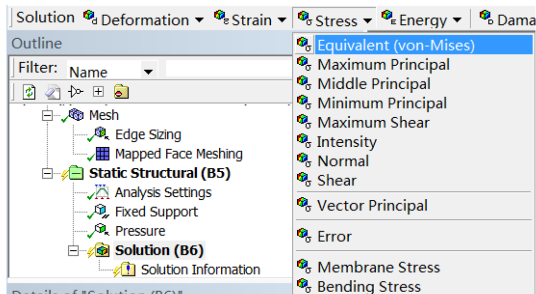


图 6-50　添加应力求解项

步骤03 求解等效应变：同操作步骤02，选择 Solution 工具栏中的“Strain”（应变）→“Equivalent（von-Mises）”命令，如图 6-51 所示，此时在分析树中会出现“Equivalent Elastic Strain”（等效应变）选项。

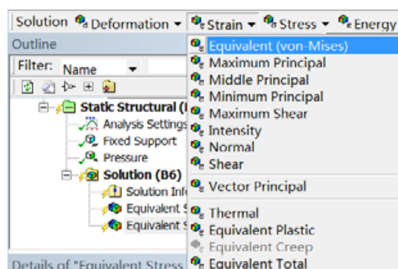


图 6-51 添加应变求解项

步骤04 提取叶片结构疲劳特性：选择 Solution 工具栏中的“Tools”（工具）→“Fatigue Tool”（疲劳工具）命令，如图 6-52 所示，此时在分析树中会出现“Fatigue Tool”（疲劳工具）选项，工具栏也显示为 Fatigue Tool，如图 6-53 所示。

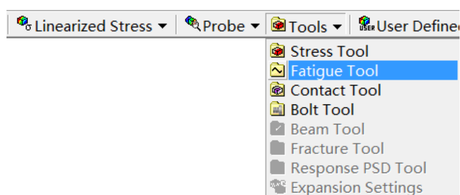


图 6-52 执行“疲劳工具”命令

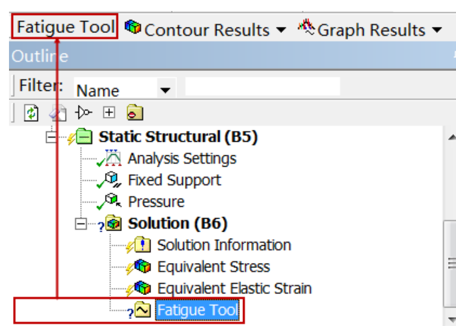


图 6-53 Fatigue Tool 工具栏

步骤05 求解叶片结构疲劳寿命：选择 Fatigue Tool 工具栏中的“Contour Results”→“Life”命令，如图 6-54 所示，此时在分析树中会出现“Life”（寿命）选项。

步骤06 求解叶片结构疲劳安全系数：选择 Fatigue Tool 工具栏中的“Contour Results”→“Safety Factor”命令，如图 6-55 所示，此时在分析树中会出现“Safety Factor”（安全系数）选项。

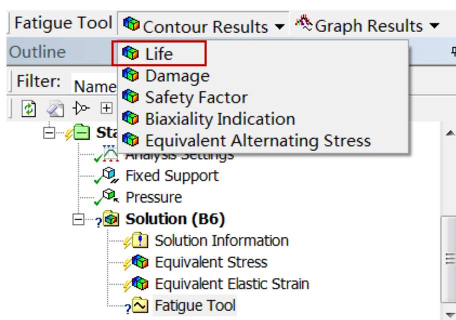


图 6-54 添加疲劳寿命求解项

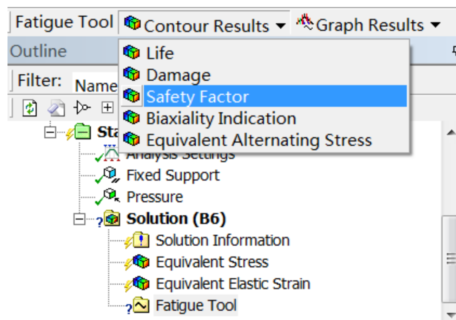


图 6-55 添加疲劳安全系数求解项



步骤07 在参数设置列表中设置叶片结构的“Design Life”（设计寿命）为 1×10^7 次循环，如图 6-56 所示。

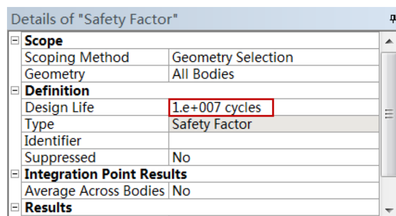


图 6-56　设计寿命

6.3.9 求解并显示结果

步骤01 在 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡“Solve”（求解）命令，如图 6-57 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解。

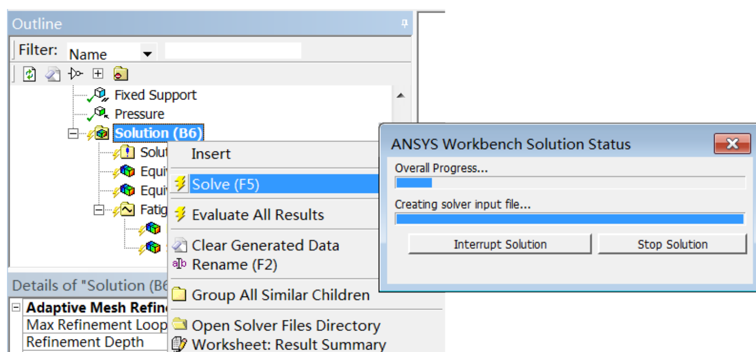


图 6-57　快捷菜单及求解进度条

步骤02 求解过程很快完成，此时的设计树显示如图 6-58 所示，表示前面的设置存在问题。本例中主要是因为 Stainless Steel 材料没有设置疲劳数据。

步骤03 在设计树中的 Fatigue Tool“Fatigue Tool”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Delete”命令，将“疲劳工具”项删除，此时的设计树如图 6-59 所示。

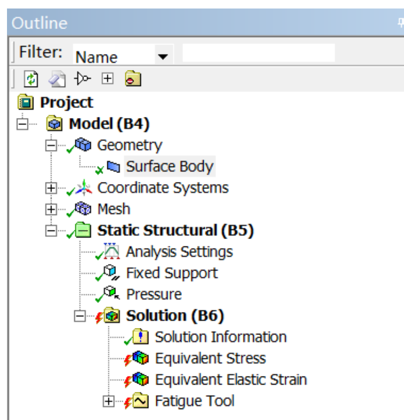


图 6-58　删除疲劳求解项前的设计树

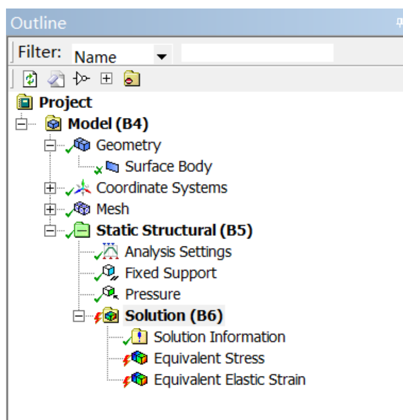


图 6-59　删除“疲劳工具”项后的设计树

步骤04 同步骤01，在 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡“Solve”（求解）命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，求解后的设计树如图 6-60 所示。

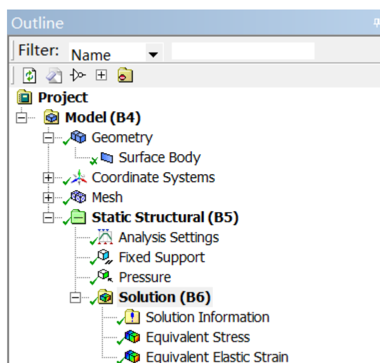


图 6-60 求解完成的设计树

步骤05 应力分析云图：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Equivalent Stress”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-61 所示的应力分析云图。

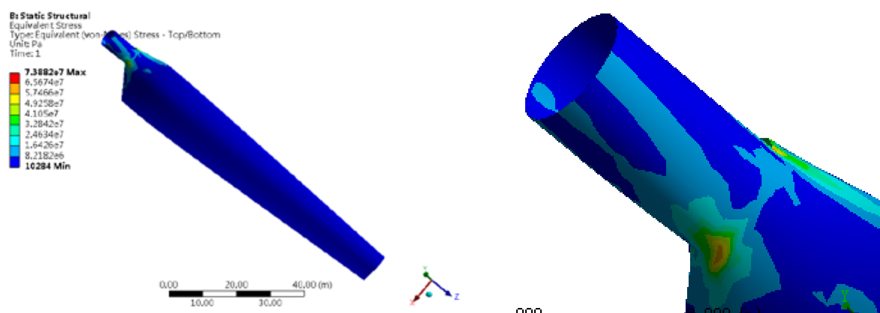


图 6-61 应力分析云图

步骤06 应变分析云图：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Equivalent Elastic Strain”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-62 所示的应变分析云图。

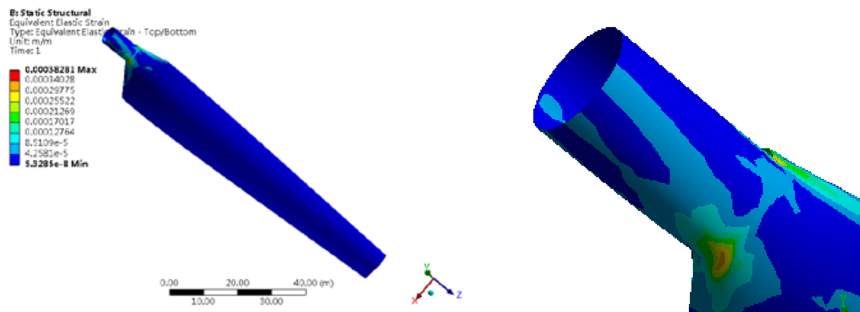
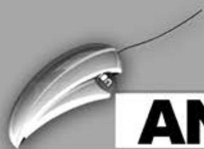


图 6-62 应变分析云图

6.3.10 更改材料观察分析结果

1．自定义材料 User Material 分析结果

步骤01 选择 Mechanical 界面左侧分析树中“Geometry”选项下的“Surface Body”，此时



即可在 Details of “Surface Body”（参数列表）中修改模型的材料为“User Material”，如图 6-63 所示。

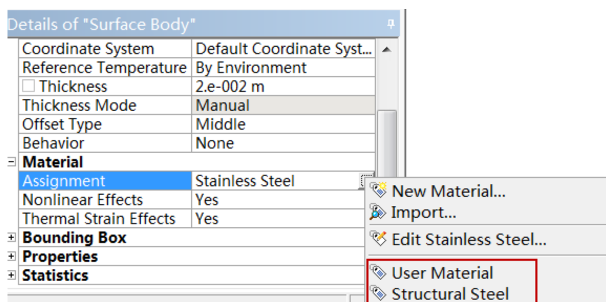


图 6-63　更改材料

步骤 02 在 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”（求解）命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

步骤 03 应力分析云图：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Equivalent Stress”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-64 所示的应力分析云图。

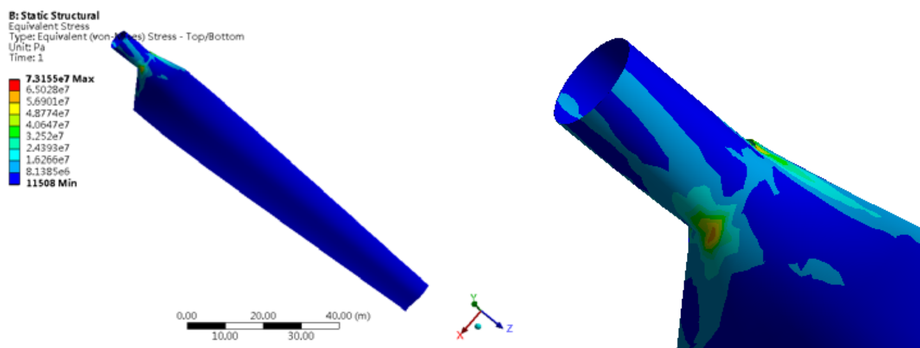


图 6-64　应力分析云图

步骤 04 应变分析云图：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Equivalent Elastic Strain”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-65 所示的应变分析云图。

步骤 05 为结果后处理项添加提取叶片结构疲劳特性，此时的设计树如图 6-66 所示。

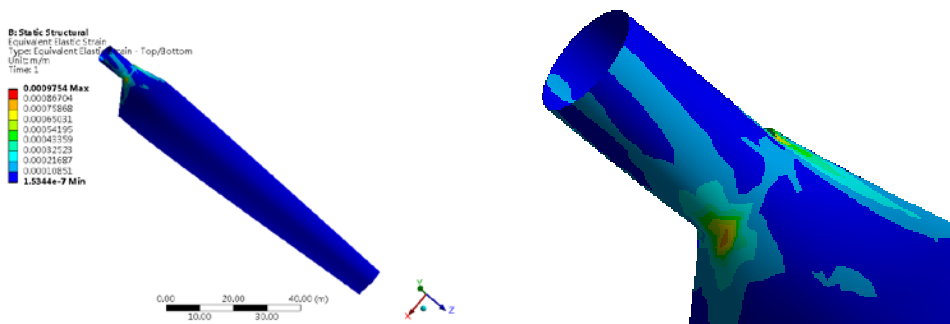


图 6-65　应变分析云图

步骤 06 在 Outline（分析树）中的“Fatigue Tool”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”（评估所有结果）命令，此时会弹出进度条，当评估完成后进度条自动消失。

步骤 07 叶片结构疲劳寿命：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下“Fatigue Tool”后的“Life”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-67 所示的寿命分析云图。

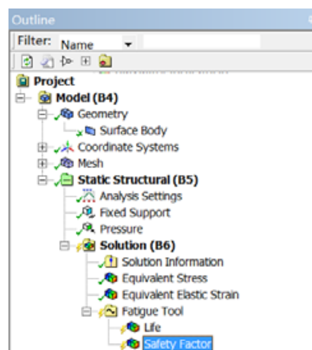


图 6-66　添加结构疲劳特性的设计树

步骤 08 叶片结构疲劳安全系数：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下 Fatigue Tool “Fatigue Tool”后的“Safety Factor”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-68 所示的安全系数分析云图。

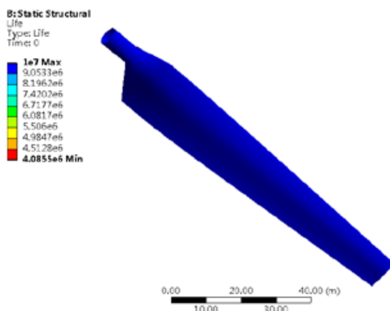


图 6-67　寿命分析云图

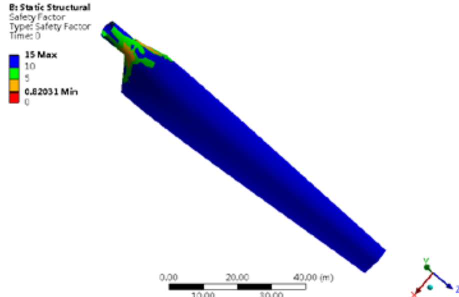


图 6-68　安全系数分析云图

2．系统默认结构钢材料（Structural Steel）分析结果

步骤 01 选择 Mechanical 界面左侧分析树中“Geometry”选项下的“Surface Body”，此时即可在 Details of“Surface Body”（参数列表）中修改模型的材料为“Structural Steel”。

步骤 02 在 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”（求解）命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

步骤 03 应力分析云图：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Equivalent Stress”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-69 所示的应力分析云图。

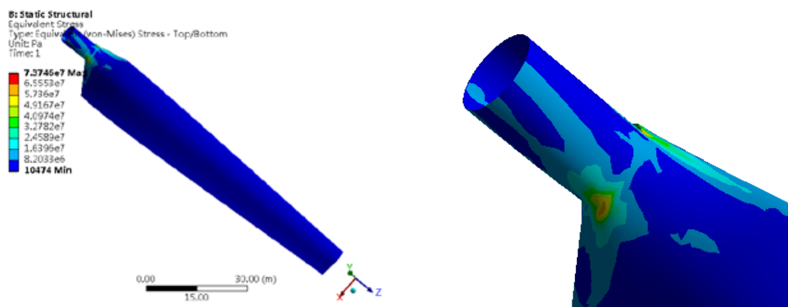


图 6-69　应力分析云图

步骤 04 应变分析云图：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Equivalent Elastic Strain”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-70 所示的应变分析云图。

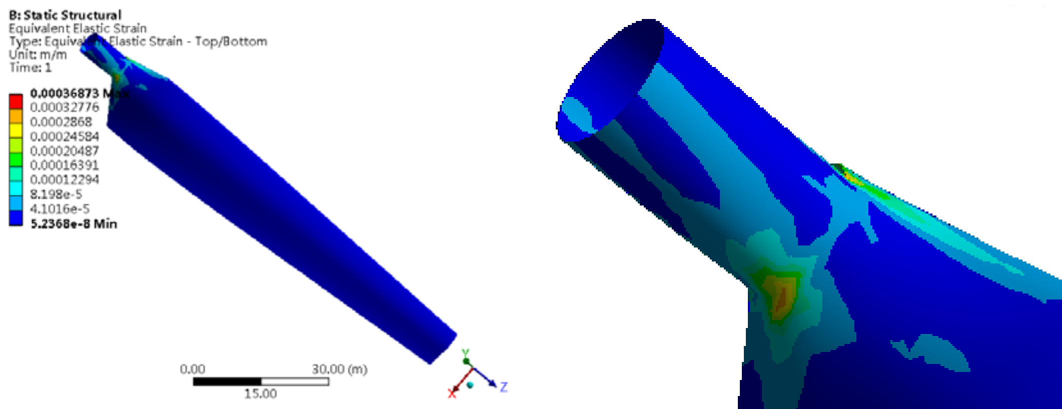


图 6-70　应变分析云图

步骤 05 叶片结构疲劳寿命：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下“Fatigue Tool”后的“Life”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-71 所示的寿命分析云图。

步骤 06 叶片结构疲劳安全系数：单击 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下“Fatigue Tool”后的“Safety Factor”选项，此时在图形窗口中会出现如图 6-72 所示的安全系数分析云图。

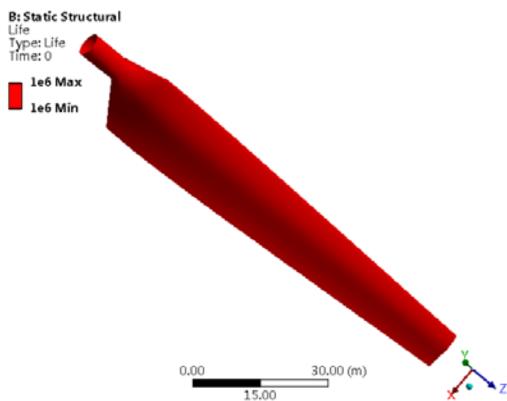


图 6-71　寿命分析云图

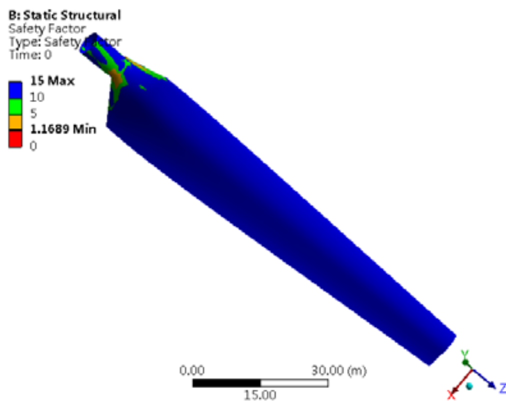


图 6-72　安全系数分析云图

6.3.11 保存与退出

步骤 01 单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。此时主界面的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 6-73 所示。

步骤 02 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 “保存”按钮，保存包含有分析

结果的文件。

步骤 03 单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

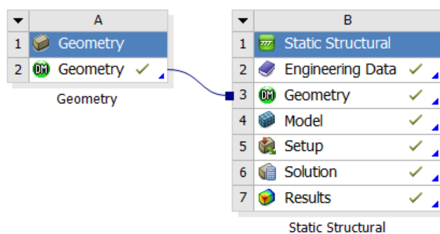


图 6-73　项目管理区中的分析项目

6.4　本章小结

本章介绍了使用 ANSYS Workbench 进行结构线性静力分析的基本过程。这种分析类型是有限元分析类型中最简单的一种，用户可以通过该类型项目的分析来熟悉软件和分析流程，达到很快入门的目的。

第 7 章　非线性静力分析

非线性现象在工程中非常普遍，常见的现象包括锻压成型、材料弯曲等。非线性现象的普遍特征是力和由力带来的位移呈非线性变化，由此导致求解花费的时间远大于线性分析。本章将介绍非线性静力学分析中的几何非线性结构分析和材料非线性结构分析。

学习目标：

- 理解进行非线性静力分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行非线性静力分析。

7.1　概述

非线性分析中，载荷与响应的非线性关系可以用下式进行表示：

$$k=\frac{\Delta F}{\Delta l}\neq \text{const}$$

式中，const 表示常量。从力和位移之间的关系看，线性问题和非线性问题的力-位移曲线如图 7-1 所示。

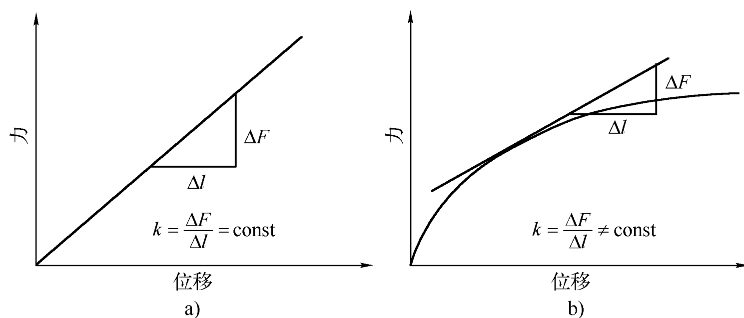


图 7-1　线性问题与非线性问题的力-位移曲线差别

a) 线性问题的力-位移曲线　b) 非线性问题的力-位移曲线

结构的非线性可能由很多原因引起，可归结为 3 大类原因：

1）几何非线性，如大应变、大挠度、应力刚化等。

2）材料非线性，如塑性-超弹性-蠕变等。

3）状态变化非线性，如接触等。

在本章中着重讨论前两类原因导致的非线性问题及其分析方法。

7.1.1 几何非线性

结构在经受大变形时，改变的几何形状可能会引起结构的非线性响应，可能的原因包括以下几类：

1．大应变

结构刚度由网格单元刚度和方向决定。从网格单元的细观层面看，单元的形状发生变化（图 7−2），从而最终引起结构的非线性响应。在求解过程中，所有的几何非线性现象几乎最终都导致网格单元的大应变现象。

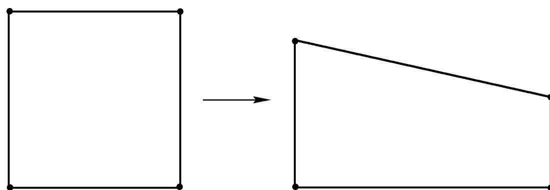


图 7−2　网格单元变形

2．大挠度

结构发生大挠度现象时，网格单元的方向可能发生变化，导致结构刚度矩阵发生改变。如悬臂梁端部承受竖直向下的载荷时，悬臂梁向下弯曲。当悬臂梁向下弯曲很小时，可以认为网格单元不发生变化，而对问题进行线性化处理，但如果弯曲很大，网格单元的方向将发生明显的改变，如图 7−3 所示。

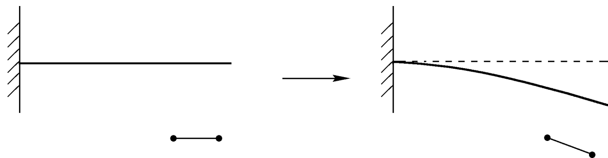


图 7−3　悬臂梁弯曲

3．应力刚化

网格单元在承受应力的情况下，可能由于应变导致非应变方向的刚度受到显著的影响，从而导致结构刚度矩阵发生变化，引起非线性响应。如细铁丝在拉紧时比松弛时更难弯折。

从包含的关系上看，大应变行为包含大挠度行为，大挠度行为包含应力刚化，如图 7−4 所示。

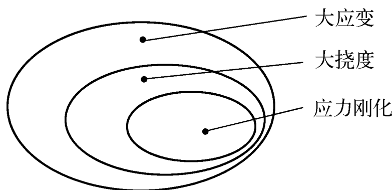


图 7−4　三种几何非线性现象关系

在几何非线性问题的分析中，根据大应变发生的情况，ANSYS Workbench 将对数据进行处理，以适应非线性迭代求解的需要。在分析中可以通过设置的方式对模型的有关参数进行相应的处理，如下文所述。

（1）应力–应变处理　真实应变（或称为对数应变）$\varepsilon_{\ln}$ 定义为：

$$\varepsilon_{\ln} = \ln\frac{l}{l_0} = \ln\left(1+\frac{\Delta l}{l_0}\right)$$

式中　l——应变后的杆长；

l_0——原始杆长。

真实应力定义为：

$$\sigma_{\mathrm{t}} = \sigma_{\mathrm{E}}(l/l_0) = \sigma_{\mathrm{E}}(1+\varepsilon_{\mathrm{E}})$$

式中，σ_{E} 表示工程应力，上式只对不可压缩的塑性应力–应变数据有效。在大应变问题的求解过程中，应力–应变输入和结果一般会被转化为真实应力和真实应变进行处理。图 7–5 所示为工程应力–应变数据和真实应力–应变数据的差异。

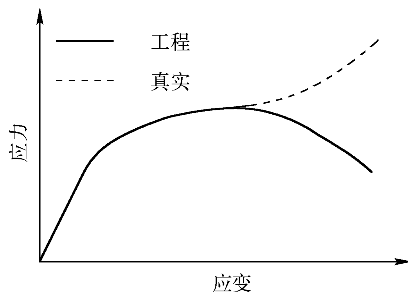


图 7–5　工程数据与真实数据的差异

（2）应力刚化处理　对于大多数结构，应力刚化的效应是与结构相关的。确定使用应力刚化时，首先打开预应力选项。这样，在以后的加载过程中，将生成一个应力刚化矩阵，并将矩阵附加到结构刚度矩阵上进行求解。

（3）大转动处理　在大挠度非线性问题的分析中，即使单元的应变很小，但单元转动量可以很大。通常通过在求解过程中激活大位移选项来处理。

7.1.2 材料非线性

材料非线性是结构非线性的常见原因。材料非线性表现在材料的应力–应变关系的非线性变化，包括材料的塑性、超弹性和蠕变等表现。其中最为典型的为材料的塑性，其表现为材料在进入屈服阶段后将发生不可逆转的变化。

图 7–6 中所示实线为材料的应力–应变曲线。材料承受应力时，如果应力始终保持在曲线前端的线性部分，那么卸载时应力将沿线性部分返回；如果承受的应力不在曲线前端的线性部分，那么卸载时应力线性返回时将不会恢复到无应变的状态，而保持一部分变形。这种应力卸去但应变保持的现象称为塑性变形。

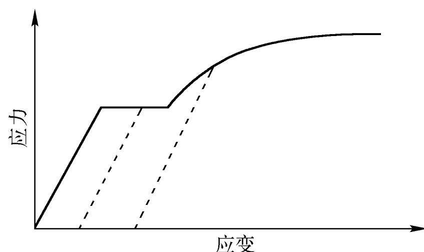


图 7–6　塑性材料应力–应变曲线

由于塑性变形不可恢复，那么加载历史对塑性材料的响应将有极大的影响。由此引发的非线性问题称为路径相关非线性。部分塑性材料，因加载速率不同，而表现出不同的非线性现象，这种现象被称为非线性问题的率相关。

工程中采用的材料一般都会表现出路径相关和率相关的非线性行为。在分析中应根据需要建立相应模型。

1．屈服准则

材料力学中有 4 个经典的强度理论，分别为最大拉应力理论、最大拉应变理论、最大剪应力理论和应变能理论（也称为 Von Mises 屈服理论）。在对塑性材料的处理过程中，主要采用 Von Mises 屈服理论。

Von Mises 应力 σ_M 的定义为：

$$\sigma_M=\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_2)^2]}$$

式中，σ_1、σ_2 和 σ_3 分别为各向主应力。

Von Mises 屈服理论认为，当材料承受的 Von Mises 应力大于屈服应力时，将会发生屈服现象。

2．流动准则

材料发生屈服后会发生流动，材料默认的流动方向遵循流动准则，即塑性应变严格垂直于屈服面的方向。

3．应变强化

塑性材料屈服后，随着应变的增大，屈服时需要的应力随之增大，称为应变强化。如图 7-7 所示绘制了有应变强化行为和无应变强化行为的应力-应变曲线。如图 7-7a 所示，应变超过屈服点后，继续变形需要的应力值不发生改变，即屈服所需应力不增大，所以没有应变强化行为；如图 7-7b 所示，应变超过屈服点后，继续变形需要的应力值增大，即屈服所需应力增大，所以有应变强化行为。

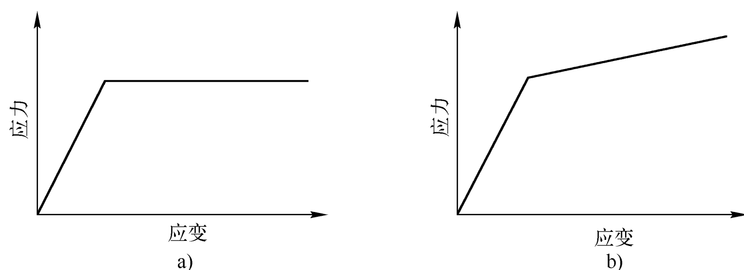


图 7-7　应变强化行为

a) 无应变强化行为的应力-应变曲线　b) 有应变强化行为的应力-应变曲线

在 ANSYS Workbench 中使用了两种强化准则，分别为等向强化和随动强化，相关内容可参考帮助文件。

7.2　非线性静力分析过程

进行非线性静力分析操作的基本过程包括：

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

需要注意的事项具体如下。

1．打开大变形选项

进行非线性几何结构静力分析时，应注意设置分析选项，将大变形选项打开。

2．添加材料数据

添加材料数据时，应定义弹性材料特性，如弹性模量、泊松比等，然后给出非线性材料特性。非线性材料的行为主要包括等向强化和随动强化。等向强化是指屈服面的大小在所有应力方向进行扩展；而随动强化是指屈服面大小保持不变，而且只在屈服方向进行移动。常见的非线性材料模型见表 7−1。

表 7−1　非线性材料模型

类　　型	特　　点
双线性随动强化	应力−应变曲线呈现两段线性线条形状，强化特征为随动强化
多线性随动强化	应力−应变曲线呈现多段线性线条形状，强化特征为随动强化
非线性随动强化	应力−应变曲线呈现非线性线条形状，强化特征为随动强化
双线性等向强化	应力−应变曲线呈现两段线性线条形状，强化特征为等向强化
多线性等向强化	应力−应变曲线呈现多段线性线条形状，强化特征为等向强化
非线性等向强化	应力−应变曲线呈现非线性线条形状，强化特征为等向强化
各向异性	不同方向上材料的性质不一样

3．简化模型

非线性分析需要使用很多次迭代才能最终求出结果，每次迭代所需要的时间与网格的数据成正相关关系；为了节省求解时间，在进行非线性分析时，应尽可能简化最终模型。

如果可以将三维结构使用二维结构（如平面模型或轴对称模型等）进行表示，或者可以使用对称或反对称表面缩减模型尺寸，那么最好使用简化的表示方法。

如果可以忽略某个非线性细节，而不影响模型的关键区域的结果，那么就应该忽略它。考虑对模型的线性部分，建立子结构，以降低中间载荷或时间增量及平衡迭代所需要的计算时间。

4．网格划分

网格划分首先应提供足够用于分析应力的网格密度。在进行求解大型分析前，应该检查网格形状，以确保网格质量满足要求。因为在大应变分析的每个子步中，第一次迭代后，网格会变得严重扭曲，可能产生的不良形状网格单元会影响求解的精度，甚至使求解失败。

修改原始网格是防止出现不良形状的一种方法。例如，拉伸试验中试件在颈缩部位会出现严重扭曲，网格也会严重扭曲。一种解决方法为在颈缩部位细化网格，使网格扭曲程度下降；另一种解决方法是使用三角单元代替四边形单元，防止网格中出现大的内角。

7.3 几何非线性静力分析示例

本节对比几何线性静力分析和非几何线性静力分析来对几何非线性静力分析的操作过程进行示例。

7.3.1 前处理

1．创建分析项目

1）在 Windows 操作系统选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A。

3）在工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Model”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B，此时相关联项的数据可共享，如图 7-8 所示。

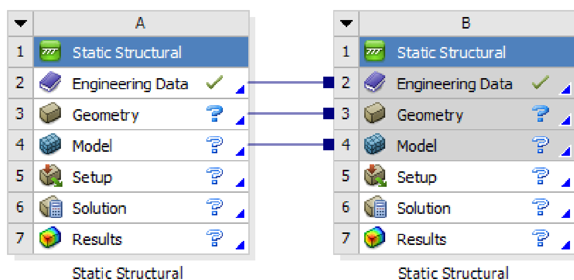


图 7-8 创建的项目工程图

2．定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，此时原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 窗口将出现。

3）根据实际需要，可在 Engineering Data Sources 表中选择相应材料，然后添加。在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，返回到初始界面中。本例中采用默认的 Structural Steel，直接退出该窗口即可。

4）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row2:Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本示例采用默认值。



5）关闭 A2: Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3．添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap07-1”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面。此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。得到的模型如图 7-9 所示。

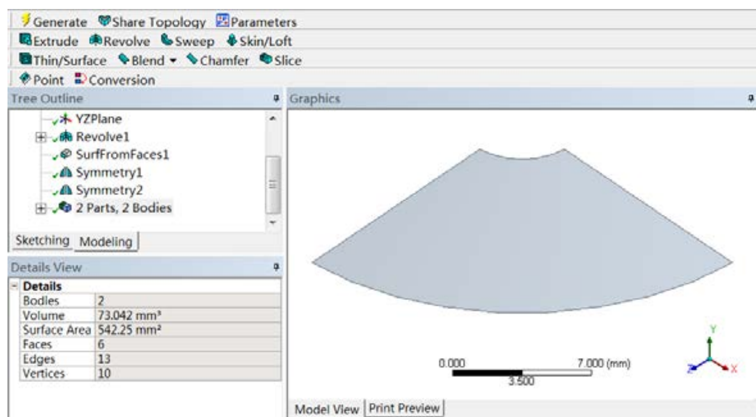


图 7-9　几何模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4．定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，如图 7-10 所示。在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

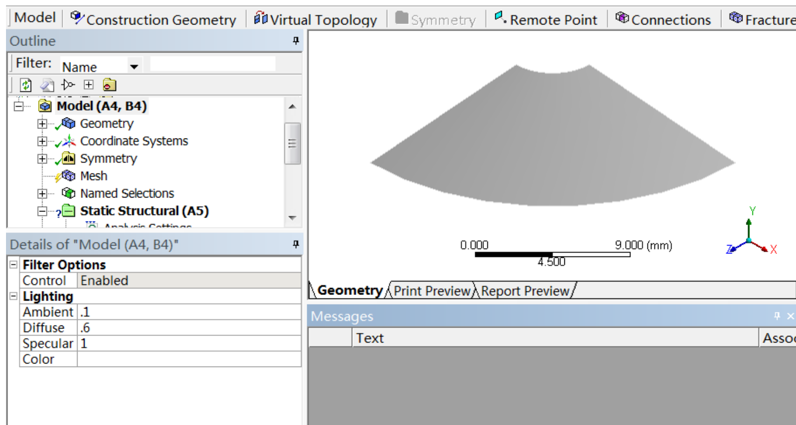


图 7-10　导入 Mechanical 界面的几何模型

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Surface Body”，此时即可在 Details of “Surface Body”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

4）在 Details of“Surface Body”细节窗口中设置“Thickness”为“0.1mm”，即面实体的厚度为 0.1mm，如图 7-11 所示。

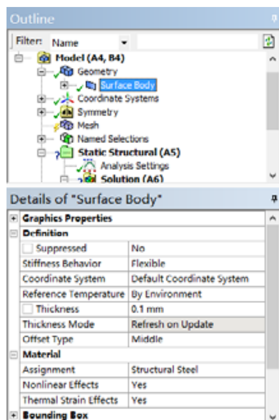


图 7-11　设置模型细节窗口

5．划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Sizing”，如图 7-12 所示。然后选择待划分的面体，在细节窗口“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“0.5mm”，如图 7-13 所示。

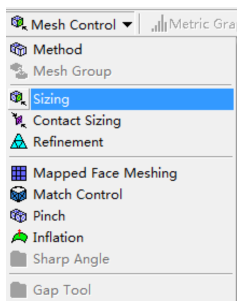


图 7-12　添加划分尺寸

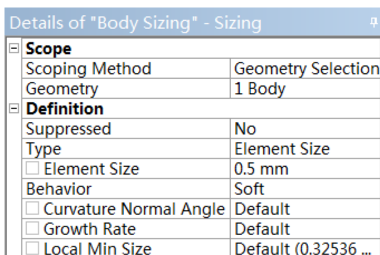


图 7-13　设置网格划分尺寸

3）在“Mesh”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Mapped ace Meshing”，如图 7-14 所示。然后选择待划分的面体，在细节窗口“Geometry”中单击“Apply”按钮，如图 7-15 所示。

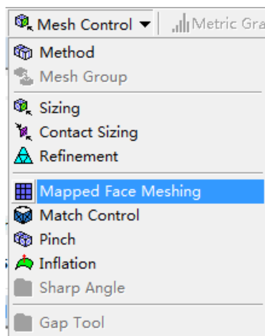


图 7-14　添加映射划分

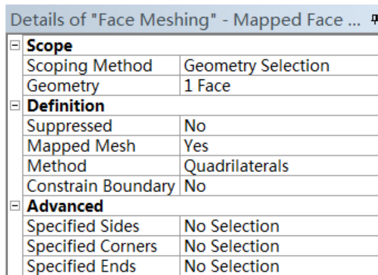


图 7-15　设置映射划分

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，如图 7-16 所示。最终生成的网格效果如图 7-17 所示。

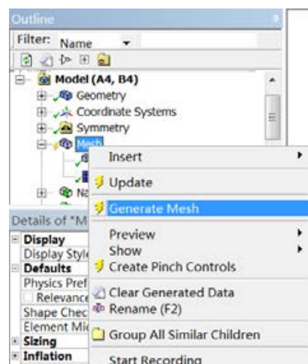


图 7-16　执行“划分网格”命令

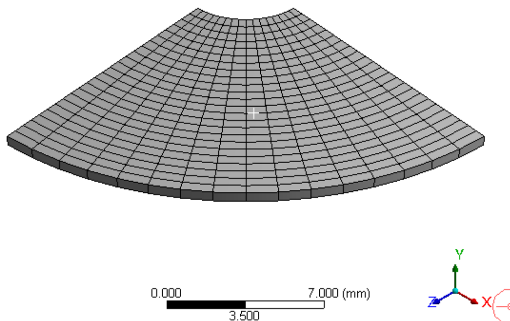


图 7-17　网格模型

6．定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，如图 7-18 所示，此时在树结构图中会出现“Displacement”选项。

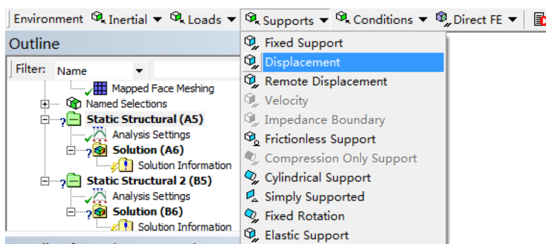


图 7-18　添加位移约束

3）选中“Displacement”，选择 *X* 方向坐标为 0 的边缘，单击 Details of“Displacement”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束。此时设置 *X* 向的位移为“0”，如图 7-19 所示。

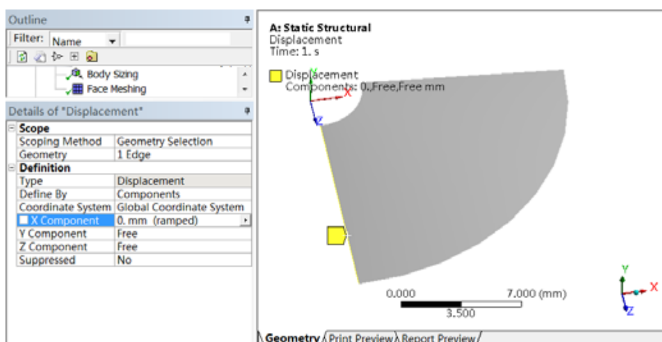


图 7-19　*X* 方向位移约束

4）按照上面的方法，继续设置 *Y* 方向坐标为 0 的边缘 *Y* 向位移为“0”。

5）按照上面的方法，继续设置 *Z* 方向坐标为 0 的边缘 *Z* 向位移为“0”。

6）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，如图 7-20 所示，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

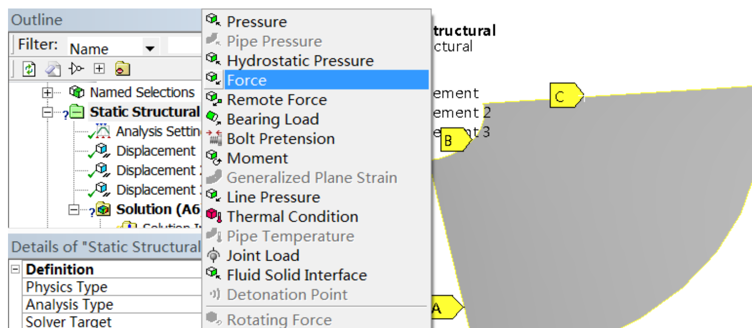


图 7-20 添加力载荷

7）选中“Force”，选择需要施加压力的内圆边缘，单击 Details of“Force”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置“Magnitude”为“-8N”，如图 7-21 所示。

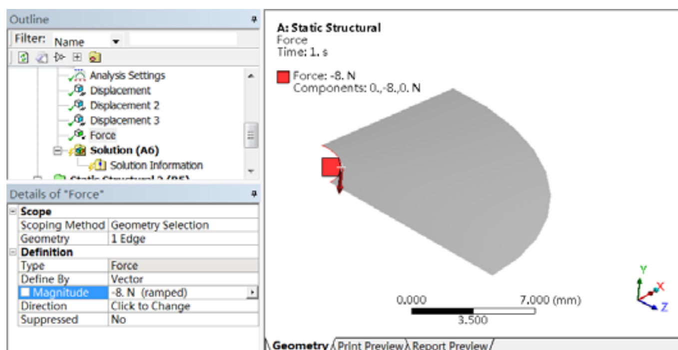


图 7-21 *Y* 向力载荷

8）在树结构图中，选择上面添加的项，右击，在弹出的快捷菜单中选择“Copy”命令复制载荷，如图 7-22 所示。

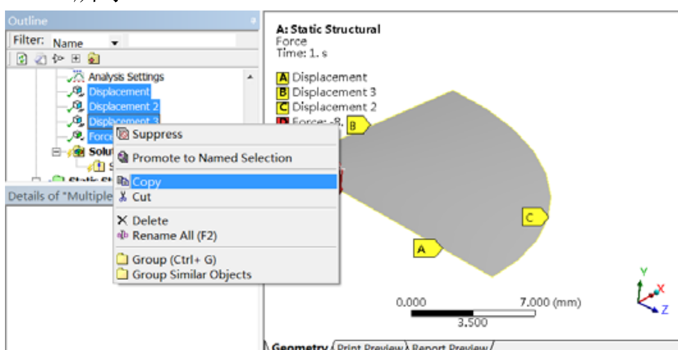


图 7-22 复制载荷



9）在树结构图中，在“Static Structural（B5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Paste”命令，粘贴得到载荷设置，如图 7-23 所示。

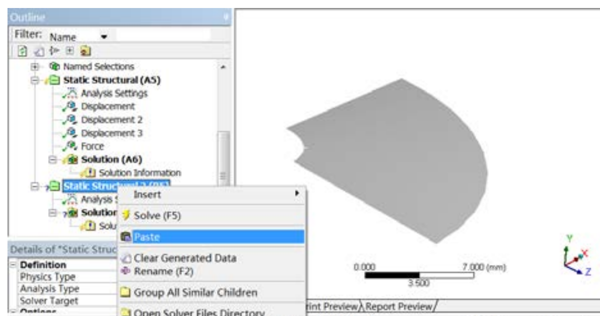


图 7-23　粘贴载荷

10）得到的 A 项目载荷图如图 7-24 所示，B 项目载荷图如图 7-25 所示。比较两图可以看到两图中的载荷一致。

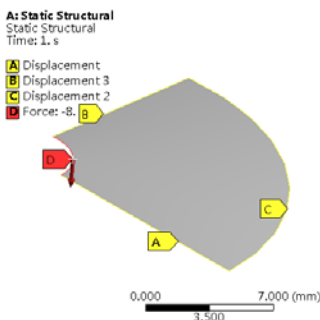


图 7-24　A 项目载荷图

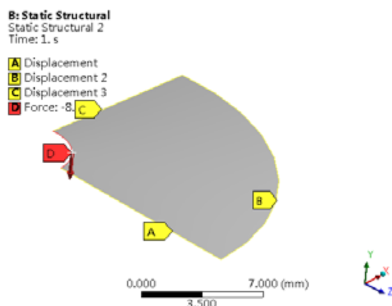


图 7-25　B 项目载荷图

7.3.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”命令，如图 7-26 所示，此时会弹出进度显示条表示正在求解，如图 7-27 所示。当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过单击“Solution Information”查看求解过程信息。

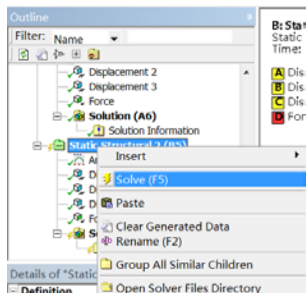


图 7-26　选择“求解”命令

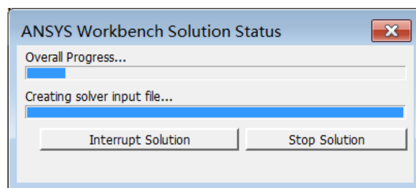


图 7-27　求解过程状态对话框

7.3.3 后处理与 B 项目

1. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，如图 7-28 所示，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，如图 7-29 所示。此时进行求解，求解后得到的 A 项目整体变形的等值线云图如图 7-30 所示。

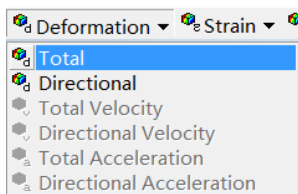


图 7-28 添加变形图

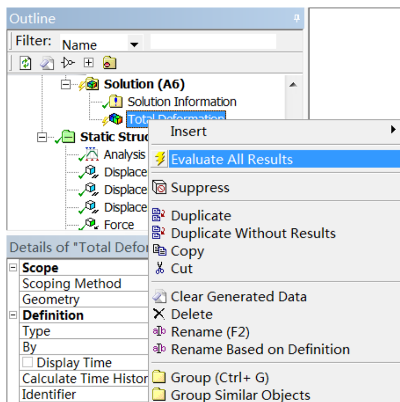


图 7-29 求解变形图

5）同样操作得到的 B 项目的整体变形的等值线云图如图 7-31 所示。

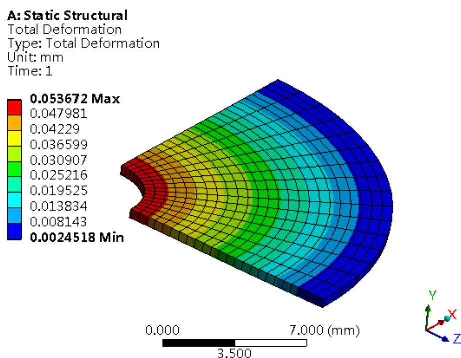


图 7-30 A 项目整体变形的等值线云图

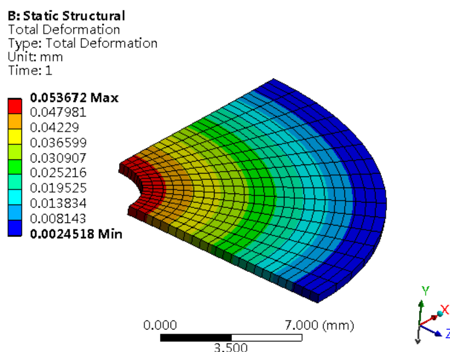


图 7-31 B 项目整体变形的等值线云图

6）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，如图 7-32 所示，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

7）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口“Geometry”

选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

8）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，如图 7-33 所示。此时进行求解，求解后得到的 A 项目整体等效应力的等值线云图如图 7-34 所示。

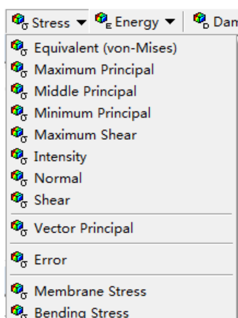


图 7-32 添加应力图

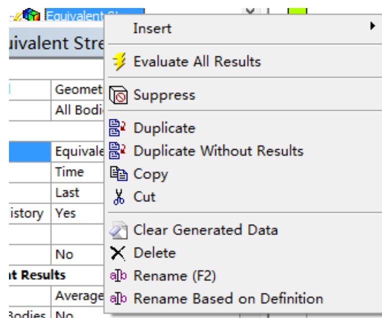


图 7-33 求解应力图

9）同样操作得到的 B 项目的整体等效应力的等值线云图如图 7-35 所示。

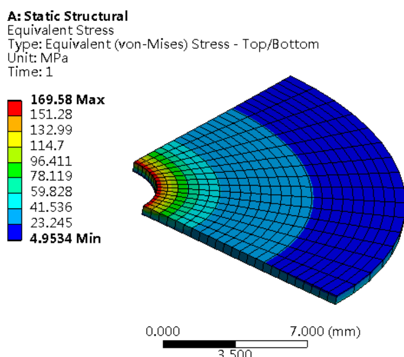


图 7-34 A 项目整体等效应力的等值线云图

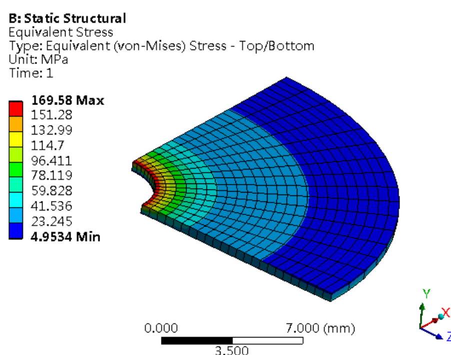


图 7-35 B 项目整体等效应力的等值线云图

2．构造路径

1）选择 Outline 树结构图中的“Model”，在工具栏中选择“Construction Geometry”，此时在树结构图中出现“Construction Geometry”对象。

2）在“Construction Geometry”对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Path”，如图 7-36 所示，此时在树结构图中出现“Path”对象。

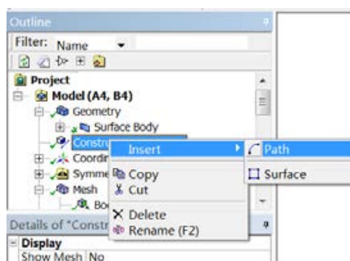


图 7-36 添加路径 1

3）选择“Path”对象，在其细节窗口中进行设置，如图 7-37 所示，图中还显示了设置得到的路径。

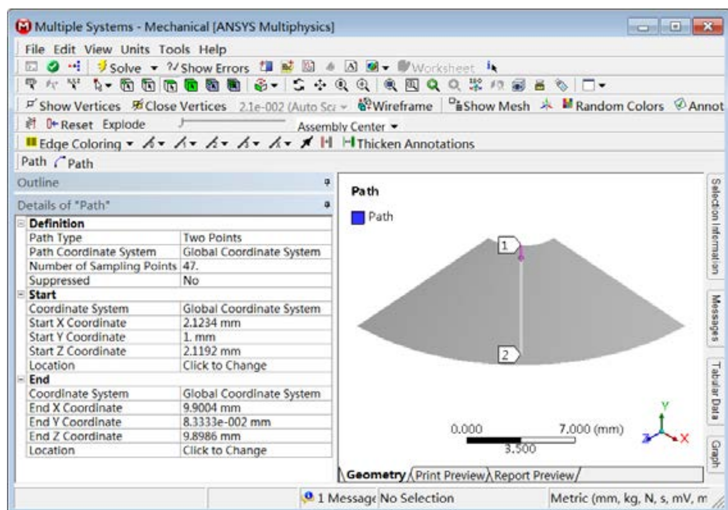


图 7-37　添加路径 2

3．查看路径结果

1）选择 Solution 工具栏中的“Linearized Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Linearized Equivalent Stress”对象。

2）在 Outline 树结构图中的“Linearized Equivalent Stress”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的路径应力数据图 1 和路径显示 1 分别如图 7-38 和图 7-39 所示。

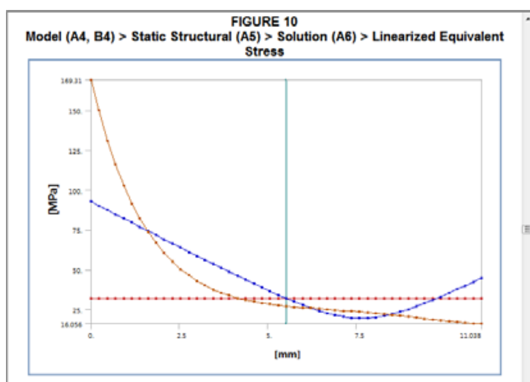


图 7-38　路径应力数据图 1

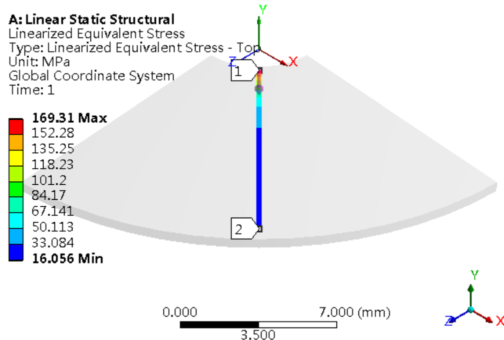


图 7-39　路径显示 1

3）同样操作得到的 B 项目的路径应力数据图 2 和路径显示 2 分别如图 7-40 和图 7-41 所示。

4）单击工具栏中的“Worksheet”按钮，还可以通过图标查看求解得到的结果，如图 7-42 所示。

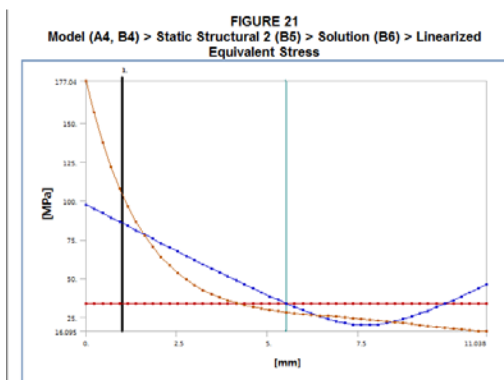


图 7-40　路径应力数据图 2

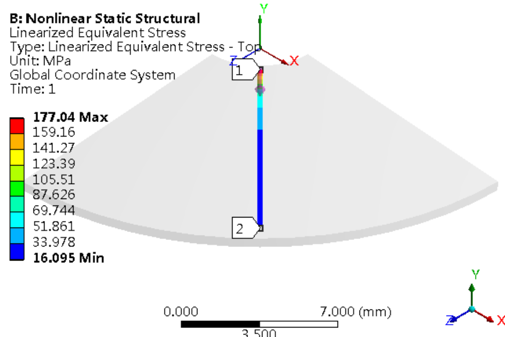


图 7-41　路径显示 2

Worksheet

Linearized Equivalent Stress

Stress Units: MPa

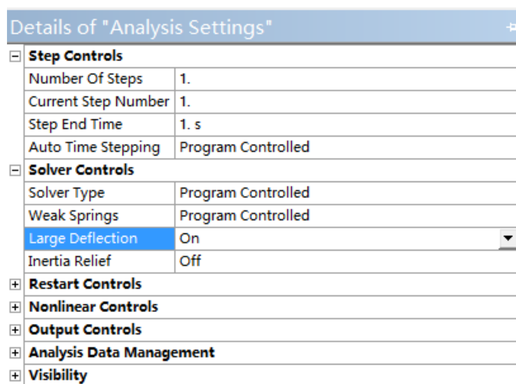
Subtype	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ	S1	S2	S3	SINT	SEQV
Membrane	-29.055	-0.15079	-29.085	1.275	1.2743	7.4312	-6.1651e-004	-21.789	-36.501	36.5	31.808
Bending (Inside)	-31.408	1.2586e-002	-31.49	-0.10853	-0.10903	33.17	1.7343	-1.1592e-003	-64.619	66.353	65.503
Bending (Outside)	31.408	-1.2586e-002	31.49	0.10853	0.10903	-33.17	64.619	1.1592e-003	-1.7343	66.353	65.503
Membrane+Bending (Inside)	-60.463	-0.1382	-60.575	1.1665	1.1652	40.601	-1.7079e-003	-20.055	-101.12	101.12	92.732
Membrane+Bending (Center)	-29.055	-0.15079	-29.085	1.275	1.2743	7.4312	-6.1651e-004	-21.789	-36.501	36.5	31.808
Membrane+Bending (Outside)	2.353	-0.16337	2.4056	1.3835	1.3833	-25.738	28.118	4.8484e-004	-23.523	51.641	44.781
Peak (Inside)	-29.528	8.8152e-002	-29.739	-0.74858	-0.74811	42.157	12.613	-1.2719e-003	-71.791	84.405	78.858
Peak (Center)	2.6543	-5.2949e-002	2.6867	0.44904	0.44892	-10.252	12.923	2.2523e-004	-7.635	20.558	17.999
Peak (Outside)	-1.5119	0.10449	-1.5608	-0.88587	-0.88573	16.51	15.078	-3.1594e-004	-18.046	33.125	28.725
Total (Inside)	-89.992	-5.005e-002	-90.314	0.4179	0.41712	82.758	-2.8817e-003	-7.4414	-172.91	172.91	169.31
Total (Center)	-26.401	-0.20374	-26.398	1.7241	1.7232	-2.8211	-3.923e-004	-23.578	-29.424	29.423	26.98
Total (Outside)	0.84108	-5.8888e-002	0.84481	0.49767	0.49756	-9.2285	10.071	1.692e-004	-8.4447	18.516	16.056

图 7-42　路径结果表格

4．B 分析设置与求解结果

B 分析与 A 分析的设置基本一致，差异在于 B 分析进行了大变形操作，操作的过程如下。

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项，在 Analysis Settings 的细节窗口中设置“Large Deflection”为“On”，如图 7-43 所示。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

图 7-43　B 项目分析设置

5．保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 7-44 所示。

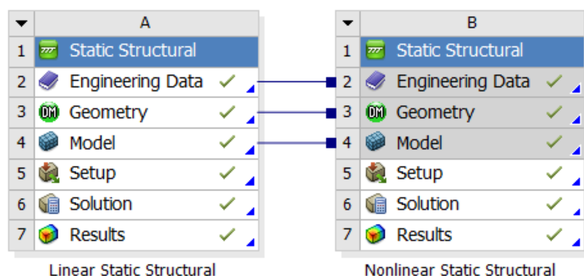


图 7-44 项目管理区中的分析项目

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

7.4 材料非线性静力分析示例

本节对材料非线性静力分析的操作过程进行示例。

7.4.1 前处理

1．创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Static Structural”，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 7-45 所示。

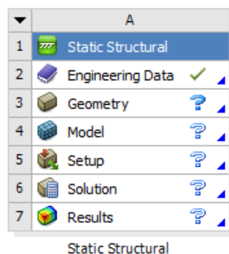


图 7-45 分析项目

2．定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入如图 7-46 所示的工程数据界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，此时原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 窗口出现。

3）根据实际需要，可在 Engineering Data Sources 表中选择相应材料并添加。然后在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，返回到初始界面中。本例中采用默认的 Structural Steel，直接退出本窗口即可。

4）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性。在 Toolbox 中展开“Plasticity”，从中选择“Bilinear Kinematic Hardening”，然后右击在

弹出的快捷菜单中选择“Include Property”，此时在 Properties of Outline 窗口中将显示 Bilinear Kinematic Hardening 属性。

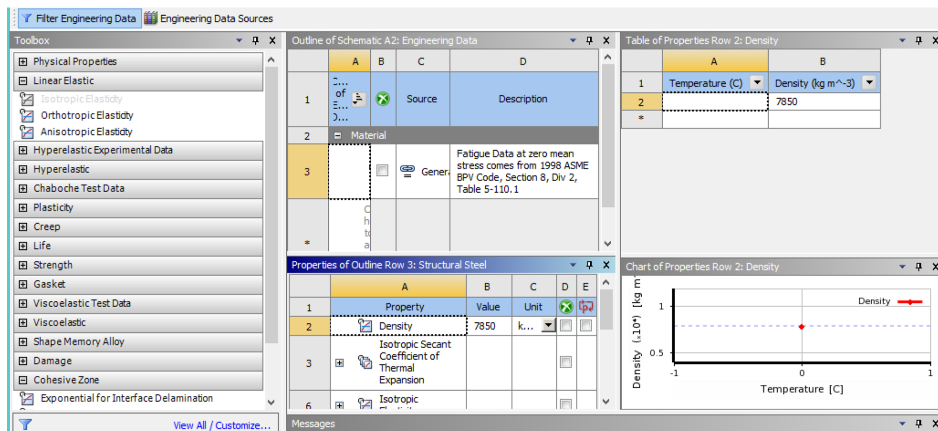


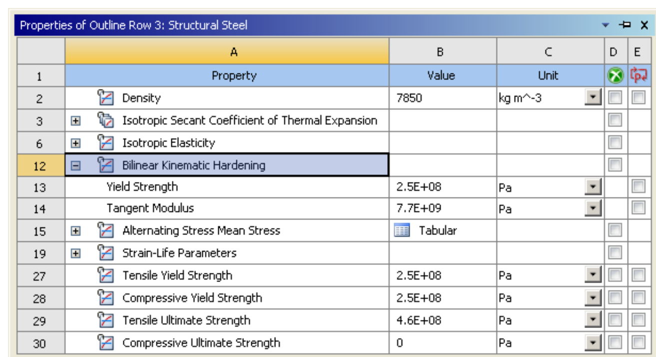
图 7-46 工程数据界面

5）设置 Bilinear Kinematic Hardening 属性如图 7-47 所示，此时在图形窗口中显示的材料响应图如图 7-48 所示。

6）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3．添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。



Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
12	Bilinear Kinematic Hardening				
13	Yield Strength	2.5E+08	Pa		
14	Tangent Modulus	7.7E+09	Pa		
15	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
19	Strain-Life Parameters				
27	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
28	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
29	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		
30	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

图 7-47 设置 Bilinear Kinematic Hardening 属性

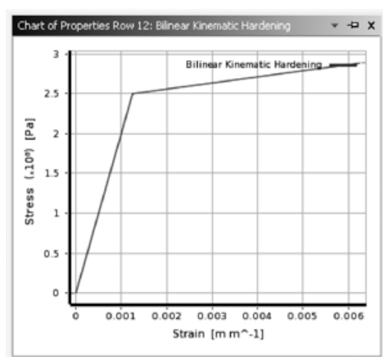


图 7-48 材料响应图

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap07-2”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Geometry”，会进入到 DM 界面，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

4）单击 ⚡Generate 按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4．定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏中的“Model”项，进入 Mechanical 界面，如图 7-49 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

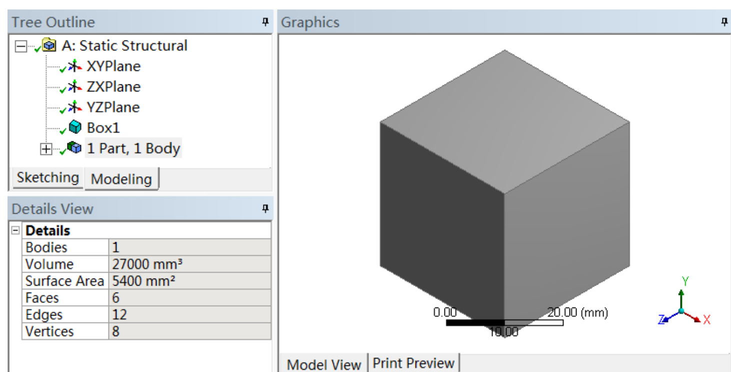


图 7-49　Mechanical 导入模型

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图 Geometry 前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5．划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上单击，在工具栏中选择“Mesh Control”→“Sizing”，如图 7-50 所示。然后选择待划分的体，在细节窗口“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“1.5mm”，如图 7-51 所示。

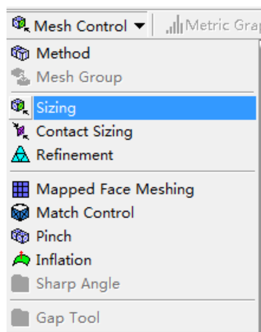


图 7-50　添加划分尺寸

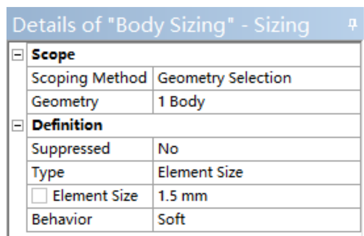


图 7-51　设置单元尺寸

3）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，如图 7-52 所示，最终的网格效果如图 7-53 所示。

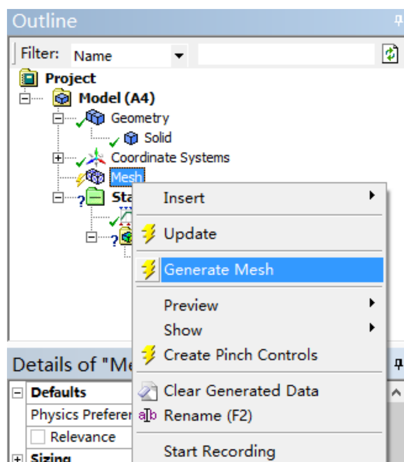


图 7-52　选择“划分网格”命令

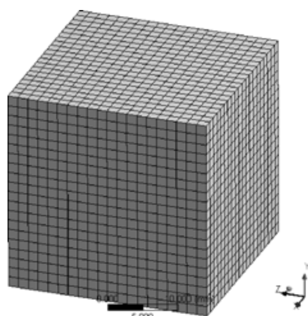


图 7-53　网格模型

6．设置集合

1）在 Outline 树结构图中选择“Model”，并在工具栏中选择“Named Selection”，此时树结构图中出现“Named Selections”项。

2）选择“Named Selections”项，单击工具栏中的“Named Selection”，创建 Selection 对象。此时，设置细节窗口中的“Scope Method”为“Worksheet”，如图 7-54 所示。

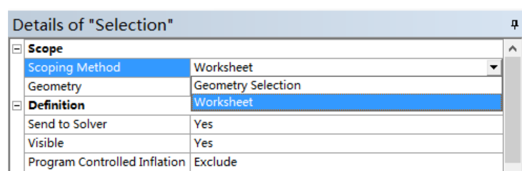


图 7-54　设置 Selection 对象

3）在图形区域将出现 Worksheet，在其表格内右击，选择“Add Row”，设置参数如图 7-55 所示，然后单击“Generate”。此时设置的集合将包含 y 坐标为“0”的所有节点。

Generate

	Action	Entity ...	Criterion	Operator	Units	Value	Lower B...	Upper B...	Coordin...
☑	Add	Mesh Node	Location Y	Equal	mm	0.	N/A	N/A	Global ...

图 7-55　选取 y 坐标为“0”的所有节点

4）同样的方法，添加 Selection1 对象，并设置如图 7-56 所示工作表，包含 y 坐标为“30”的所有节点。

Generate

	Action	Entity ...	Criterion	Operator	Units	Value	Lower B...	Upper B...	Coordin...
☑	Add	Mesh Node	Location Y	Equal	mm	30.	N/A	N/A	Global ...

图 7-56　选取 y 坐标为“30”的所有节点

5）查看两个集合对象的细节窗口，其内容见表 7-2。

表 7-2　两个集合的细节窗口内容

Scope	
Scoping Method	Worksheet
Geometry	1281 Nodes
Definition	
Sendto Solver	Yes
Visible	Yes
Program Controlled Inflation	Exclude
Statistics	
Type	Manual
Total Selection	1281 Nodes
Suppressed	0
Used by Mesh Worksheet	No
Tolerance	
Tolerance Type	Program Controlled
Zero Tolerance	1.e-008
Relative Tolerance	1.e-003

7．设置求解选项

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Model（A4）”→“Static Structural（A5）”→“Analysis Settings”，修改 Step Controls 细节窗口中的参数，见表 7-3。

表 7-3　Step Controls 细节窗口中的参数

Number Of Steps	2
Current Step Number	1
Step End Time	1.s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	20
Minimum Substeps	20
Maximum Substeps	20

8．定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Displacement”对象。

3）选中“Displacement”，单击 Details of “Displacement”细节窗口中的“Scoping Method”并修改后面的选项为“Named Selection”。

4）在“Named Selection”中设置“Selection 2”，在“Y Component”行单击后面的展开键，然后选择“Tabular Data”。此时对象名称变为“Nodal Displacement”。

5）在 Tubular Data 窗口中设置载荷参数，见表 7-4。此时在 Graph 窗口中将出现载荷历程图，如图 7-57 所示。

表 7-4　载荷参数

Steps	Time/s	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	0	0	0	0
1	1	0	−0.5	0
2	2	=0	0	=0

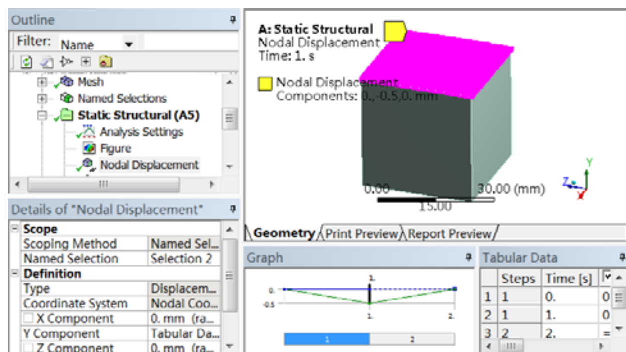


图 7-57　施加节点载荷

6）按照上面的方法，添加“Nodal Displacement 2”（名称可以设置），其各个参数见表 7-5。

表 7-5　边界条件部分参数表

	Nodal Displacement	Nodal Displacement2
Scope		
Scoping Method	Named Selection	Named Selection
Named Selection	Selection2	Selection
Definition		
Type	Displacement	Displacement
Coordinate System	Nodal Coordinate System	Nodal Coordinate System
X Component	0.mm(ramped)	0.mm(ramped)
Y Component	Tabular Data	0.mm(ramped)
Z Component	0.mm(ramped)	0.mm(ramped)
Suppressed	No	No
Tabular Data		
Independent Variable	Time	

7）得到的载荷图如图 7-58 所示。

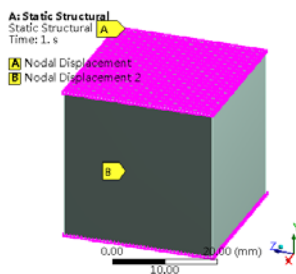


图 7-58 载荷图

7.4.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

7.4.3 后处理

1. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构图中会出现“Directional Deformation”对象。

3）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构图中会出现“Directional Deformation 2”对象。

4）两个对象的细节窗口中设置部分内容见表 7-6。

表 7-6 变形图设置

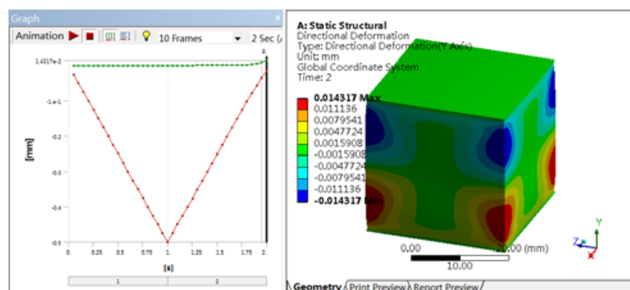
	Directional Deformation	Directional Deformation 2
	Scope	
Scoping Method	Geometry Selection	Named Selection
Geometry	All Bodies	
Named Selection		Selection 2

5）在 Outline 树结构图中的“Directional Deformation”对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的图形如图 7-59 和图 7-60 所示。

6）选择 Solution 工具栏中的“Probe”→“Force Reaction”，此时在树结构图中会出现“Force Reaction”对象。

7）设置“Force Reaction”对象的细节窗口中“Boundary Condition”为“Nodal Displacement 2”，“Result Selection”为“Y Axis”。

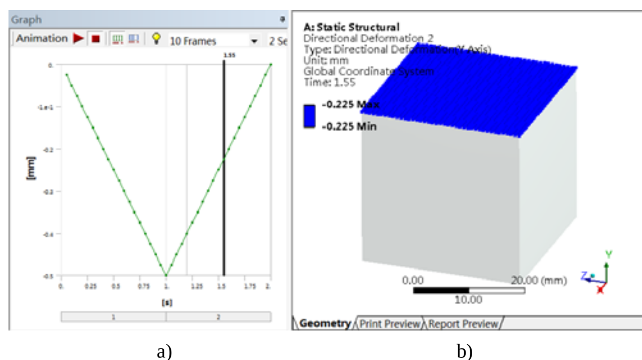




a)　　　　　　　　b)

图 7-59　Directional Deformation 对象显示

a）时间历程数据显示　b）变形云图

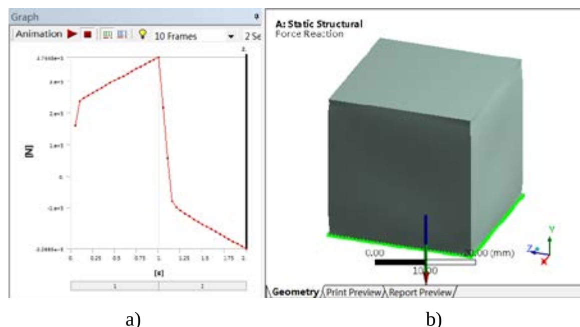


a)　　　　　　　　b)

图 7-60　Directional Deformation 1 对象显示

a）时间历程数据显示　b）变形云图

8）在 Outline 树结构图中的“Force Reaction”对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的图形如图 7-61 所示。



a)　　　　　　　　b)

图 7-61　Force Reaction 对象显示

a）时间历程数据显示　b）图形显示

9）选择“Solution”，在工具栏中单击“New Chart and Table”按钮，此时在 Outline 树结构图中出现“Chart”对象。

10）设置“Chart”对象的细节表如图 7-62 所示，得到的相关数据如图 7-63 所示，位移-载荷图如图 7-64 所示。

Details of "Chart"	
Definition	
Outline Selection	2 Objects
Chart Controls	
X Axis	Directional Deformation 2 (Max)
Plot Style	Both
Scale	Linear
Gridlines	None
Axis Labels	
X-Axis	displacement
Y-Axis	reaction force
Report	
Content	Chart And Tabular Data
Caption	
Input Quantities	
Time	Omit
Output Quantities	
[A] Force Reaction (Y)	Display
[B] Directional Deformation 2 (Min)	Display
Directional Deformation 2 (Max)	X Axis

图 7-62　Chart 对象的细节表

Tabular Data

	Steps	Time [s]	[B] Directional Deformation 2
1	1	5.e-002	-2.5e-002
2	1	0.1	-5.e-002
3	1	0.15	-7.5e-002
4	1	0.2	-0.1
5	1	0.25	-0.125
6	1	0.3	-0.15
7	1	0.35	-0.175
8	1	0.4	-0.2
9	1	0.45	-0.225
10	1	0.5	-0.25
11	1	0.55	-0.275
12	1	0.6	-0.3
13	1	0.65	-0.325
14	1	0.7	-0.35
15	1	0.75	-0.375
16	1	0.8	-0.4
17	1	0.85	-0.425
18	1	0.9	-0.45
19	1	0.95	-0.475

图 7-63　相关数据

2．保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 7-65 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

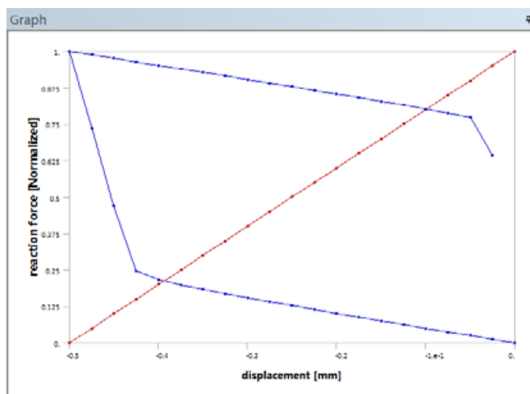


图 7-64　位移-载荷图

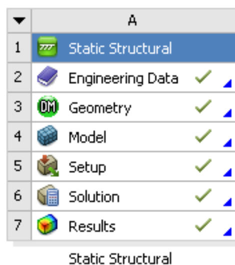


图 7-65　完成的分析项目

7.5　本章小结

本章介绍了使用 ANSYS Workbench 进行两种非线性静力分析的操作方法。几何非线性和材料非线性是常见的非线性，在结构分析中应该考虑，其得到的结果比线性分析更加可靠。但需要注意，非线性分析的求解花费的时间较线性分析的求解代价明显提高，在进行分析中必须考虑。

第 8 章　接 触 分 析

在有限元模型中，如果不同的部件之间没有结合在一起，有时还需要考虑摩擦力的问题，就有必要在模型中定义接触，称为接触问题。这是一种高度非线性的问题，需要花费大量的求解时间。本章将介绍接触分析的有关内容，主要包括接触的设置方法和分析流程。

学习目标：

- 理解进行接触分析的步骤。
- 了解接触设置的相关概念。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行接触分析。

8.1　接触分析过程

接触分析的整体过程与其他分析的过程基本一致，区别在于接触分析中需要对接触进行设置，在查看结果时应注意查看接触界面的有关信息来确保接触设置合理。

8.1.1　接触分析流程

以在静力分析中进行接触分析流程为例，接触分析的主要流程包括：

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接，包括接触。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

8.1.2　接触设置

接触是指在分析中零件之间发生干涉的现象，如图 8-1 所示。接触设置就是通过设置参

数来控制这种干涉行为。

接触设置的细节窗口如图 8-2 所示。进入接触设置的方法有：

1）在 Outline 树结构图中单击 Connections 对象。

2）在 Connections 对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Manual Contact Region”。对于自动检测并引入的接触，无需该步骤。

3）选择 Contact Region，此时便出现如图 8-2 所示的细节窗口。

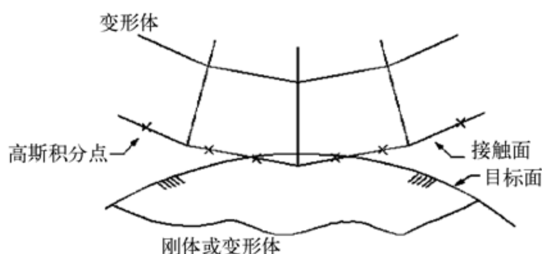


图 8-1　接触检测

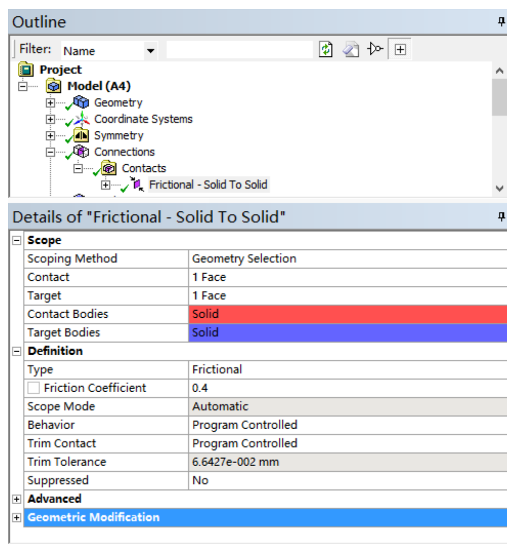


图 8-2　接触设置细节窗口

在进行接触设置时，首先设置 Scoping Method，可以采用 Geometry Selection 或 Named Selection，一般采用前者进行几何选取即可。

然后设置接触面（Contact）和目标面（Target），设置完成后自动出现 Contact Bodies 和 Target Bodies。

接触类型的设置由 Definition 栏中包含的项目完成，支持的接触类型如图 8-3 所示，包括：

- Bonded——键合，该类型的接触可以在所有的接触区域构型上使用。键合时，接触界面上不会出现滑移或分离线型。可以认为接触界面粘接在一起。
- No Separation——无分离，该类型接触与键合类似，仅可以用于三维分析中的面接触和二维分析中的边缘接触。无分离时，接触界面上不会出现分离线型，但可能出现微量无摩擦的滑动。
- Frictionless——无摩擦，该类型接触为典型的单边接触，其在接触界面正向压力为 0 时，允许分离的发生。在界面上，该类型接触所定义的摩擦因数为 0，允许自由滑动。
- Rough——粗糙，该类型接触与无摩擦相类似，但不允许摩擦界面上的滑动。
- Frictional——摩擦，该类型接触与无摩擦相类似，但定义了摩擦界面上滑动的摩擦因数。

➢ Forced Frictional Sliding——强制摩擦滑动，该类型接触在每个摩擦接触点上施加一个切向阻力。

Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	Bonded
Scope Mode	No Separation
Behavior	Frictionless
Trim Contact	Rough
Trim Tolerance	Frictional
	Forced Frictional Sliding

图 8-3　接触的类型

Advanced（高级）选项设置中，常需要设置的选项包括：

➢ Formulation——设置算法，常用的算法如图 8-4 所示。

Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Augmented Lagrange
Elastic Slip Tolerance	Pure Penalty
Normal Stiffness	MPC
Update Stiffness	Normal Lagrange
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	

图 8-4　算法设置

➢ Detection Method——设置干涉检测方法，常用的检测方法如图 8-5 所示。

Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	On Gauss Point
Normal Stiffness	Nodal-Normal From Contact
Update Stiffness	Nodal-Normal To Target
Stabilization Damping Factor	Nodal-Projected Normal From Contact
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	

图 8-5　检测方法设置

➢ Penetration Tolerance——设置穿透公差的参数，可设置的方法如图 8-6 所示。

Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Value
Update Stiffness	Factor

图 8-6　接触公差设置

➢ Interface Treatment——设置界面处理方式，可进行的设置如图 8-7 所示。该设置在过盈配合等场合有重要应用。

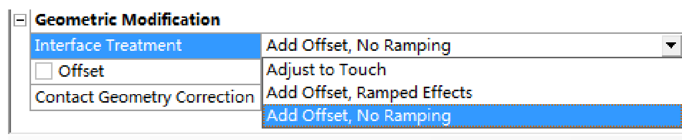


图 8-7 界面处理设置

■ 设置为“Adjust to Touch”时，界面上存在的间隙将会自动补偿到进行接触的状态，如图 8-8 所示；而对于存在的干涉，将自动消除，如图 8-9 所示。

■ 使用带 Offset 补偿的方法，需要设置补偿值，正值代表将接触面向目标面进行补偿，其作用原理如图 8-8 所示。

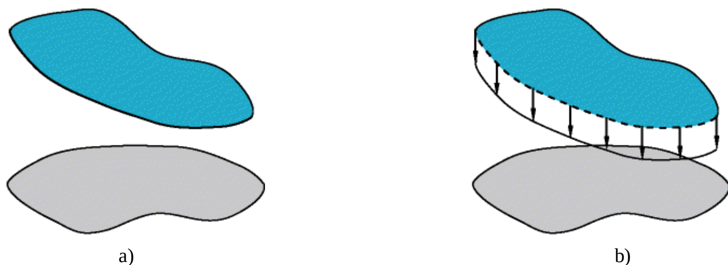


图 8-8 补偿界面间隙

a) 存在初始间隙 b) 补偿间隙

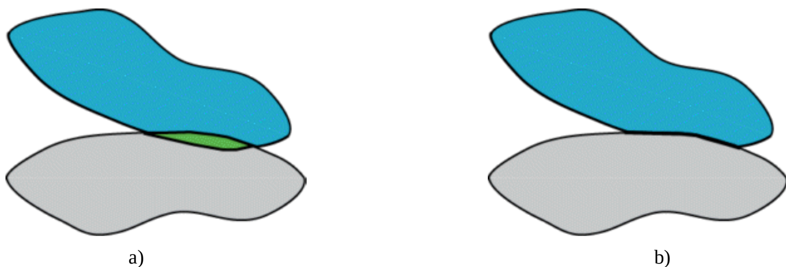


图 8-9 消除界面干涉

a) 存在初始干涉 b) 消除干涉

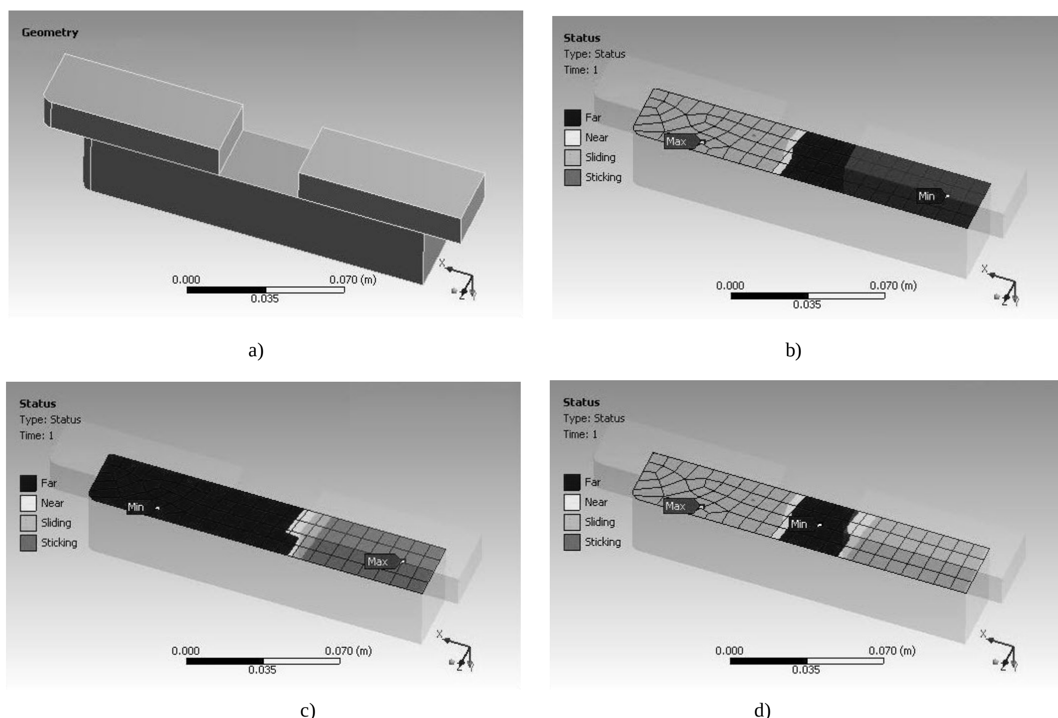
8.1.3 接触分析结果

接触分析结果由 Solution 工具栏中的“Tools”→“Contact Tool”命令提供。可提供的结果内容包括：

➢ Gap——接触间隙。
➢ Penetration——接触穿透。
➢ Pressure——接触压力。
➢ Frictional Stress——摩擦应力。

➢ Sliding Distance——滑移距离。
➢ Fluid Pressure——流体压力。
➢ Status——接触状态，其提供的代码包括：
■ 0——分离且远离：使用 Far 进行标示。
■ 1——分离但接近：使用 Near 进行标示。
■ 2——接触但滑移：使用 Sliding 进行标示。
■ 3——接触并粘接：使用 Sticking 进行标示。

如图 8-10 所示显示了不同的接触状态。



a) b) c) d)

图 8-10　接触状态

a) 模型　b) 左滑块接触状态　c) 右滑块接触状态　d) 两滑块与底部的接触状态

接触工具（Contact Tool）的使用方法如下。

1）通过选择 Solution 工具栏中的“Tools”→“Contact Tool”，或右击 Solution 对象，并从弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Contact Tool”，向 Outline 树结构图中添加一个 Contact Tool 对象。

2）右击 Contact Tool 对象，并从弹出的快捷菜单中选择具体的接触结果内容。

8.2　接触分析示例

本例通过螺栓联接来对接触分析进行示例。需要注意的是，螺栓取 1/4 对称模型结果误差较大，但本节的目的是示例，读者在分析时应注意采用准确的模型。

8.2.1 前处理

1．创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 8-11 所示。

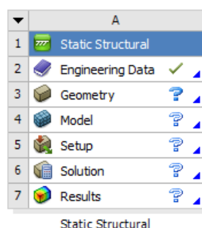


图 8-11　分析项目

2．定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入如图 8-12 所示的工程数据界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

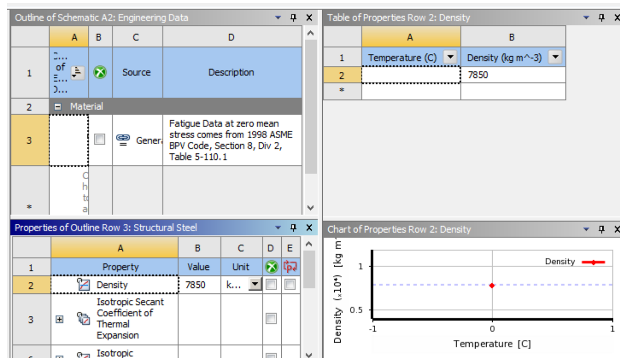


图 8-12　工程数据界面

2）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，此时原界面窗口中的 Outline of Schematic A2:Engineering Data 消失，Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 窗口出现，如图 8-13 所示。

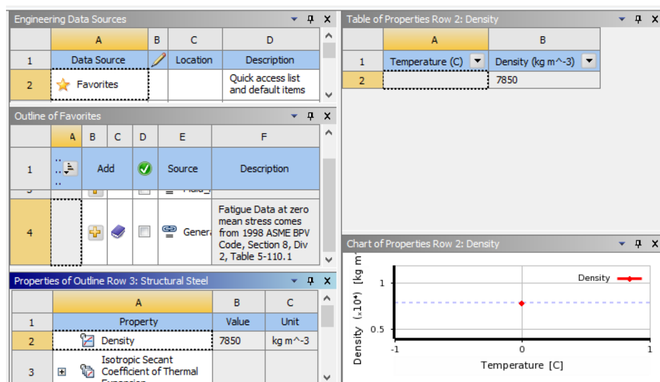


图 8-13　工程数据库界面

3）单击 Engineering Data Sources 窗口（图 8-14）中的“General Materials”，此时 Outline 窗口显示为 Outline of General Materials（图 8-15）。

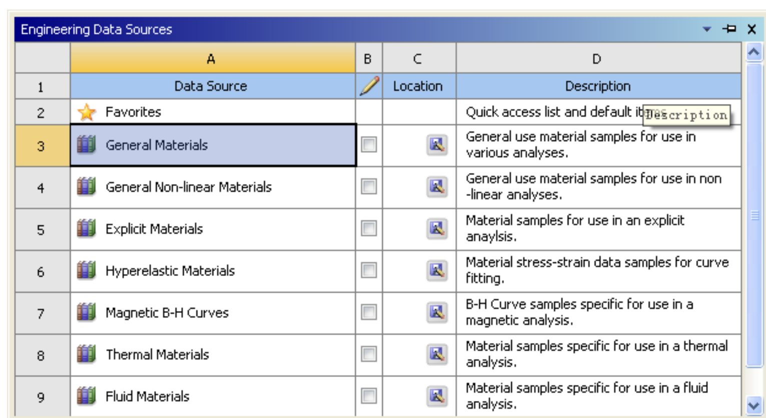


图 8-14　Engineering Data Sources 窗口

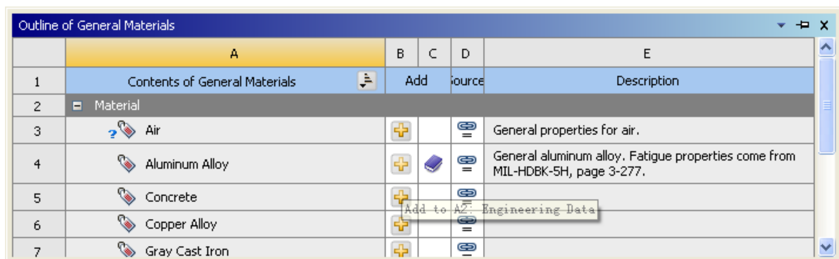


图 8-15　Outline of General Materials 窗口

4）在 Outline of General Materials 窗口中，选择“Aluminum Alloy”，并单击后面的添加符号。

5）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，返回到初始界面中，此时 Outline of Schematic A2 中显示添加的 Aluminum Alloy。

6）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料添加完毕。

3．添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”命令，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap08”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，进入到 DM 界面，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，如图 8-16 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。注意，完整的模型如图 8-17 所示。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4．定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

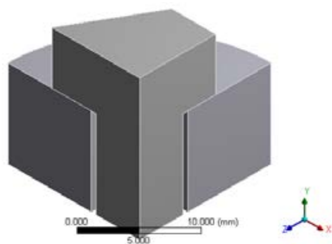


图 8-16 导入的 1/4 近似对称模型

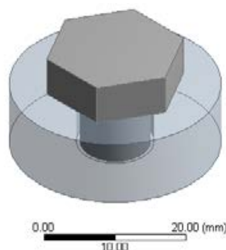


图 8-17 完整模型

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 1 个 Solid 右击，如图 8-18 所示，从弹出的快捷菜单中选择“Rename”，更名为“STUD”。

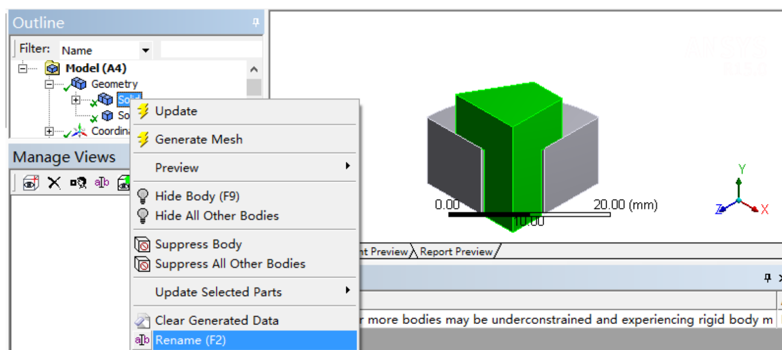


图 8-18 重命名

3）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 2 个 Solid，右击，从弹出的快捷菜单中选择“Rename”，将其更名为“BASE”。该零件对应如图 8-19 中所示高亮零部件。

4）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“BASE”，此时即可在 Details of “BASE”细节窗口中给模型添加材料。

5）单击参数列表“Material”下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择“Aluminum Alloy”即可将其添加到模型中，如图 8-20 所示，此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。

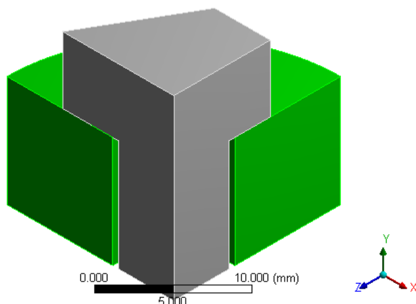
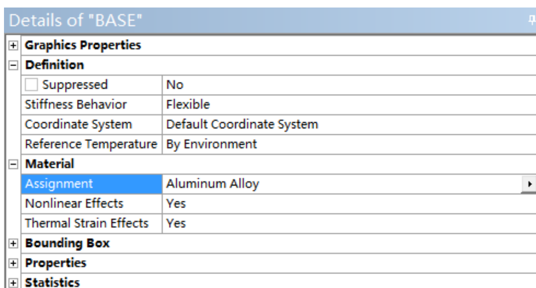


图 8-19 零部件 BASE



Details of "BASE"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Aluminum Alloy
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 8-20 添加 Aluminum Alloy 后的细节窗口

5．设置接触

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图“Connections”对象下“Contacts”中的接触对象，设置细节窗口内容，主要设置“Type”为“Frictional”，“Friction Coefficient”为“0.4”。

2）选择 STUD 上的接触面，单击“Contact”后再单击“Apply”按钮。

3）选择 BASE 上的接触面，单击“Target”后再单击“Apply”按钮。

4）细节窗口设置和得到的设置示意图如图 8-21 所示。

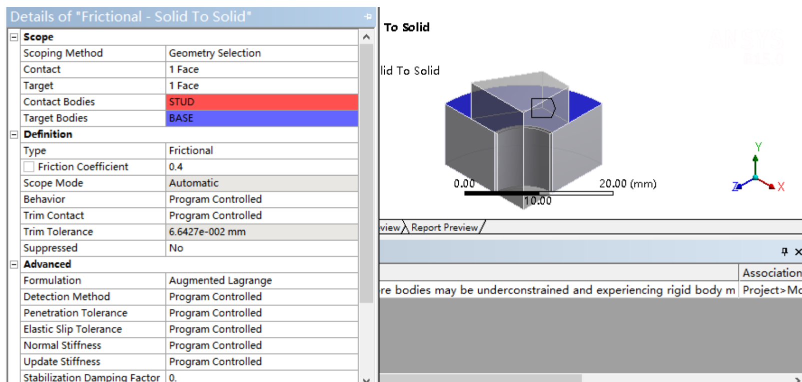


图 8-21　设置接触

6．划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of “Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上单击，在工具栏中选择“Mesh Control”→“Sizing”，如图 8-22 所示，然后选择待划分的所有体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“1mm”，参数设置见表 8-1。

3）在“Mesh”上右击，从弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Method”，然后选择待划分的所有体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，并设置细节窗口，见表 8-1。

表 8-1　局部网格控制选项设置

	Body Sizing	Multi Zone
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection
Geometry	2 Bodies	2 Bodies
Definition		
Suppressed	No	No
Type	Element Size	
Element Size	1 mm	
Method		Multi Zone
Mapped Mesh Type		Hexa

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，最终的网格效果如图 8-23 所示。

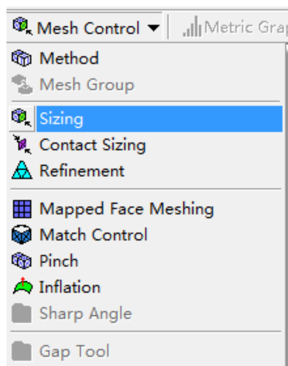


图 8-22 添加网格尺寸控制

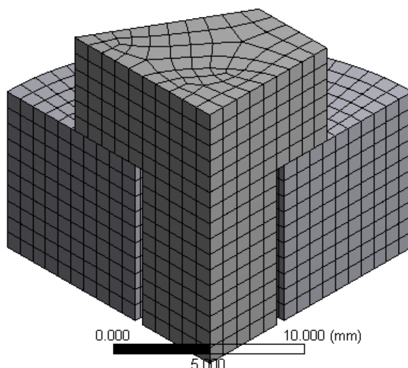


图 8-23 网格划分效果

7. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Frictionless Support”命令，此时在树结构图中会出现“Frictionless Support”对象。

3）按步骤 2）的方法继续添加 Frictionless Support 2 对象。

4）按步骤 2）的方法继续添加 Frictionless Support 3 对象。

5）单击对象“Frictionless Support”，选择 *Y* 向坐标为 0 的面，在“Geometry”中单击“Apply”按钮，如图 8-24 所示。

6）单击对象“Frictionless Support 2”，选择 *X* 向坐标为 0 的面，在“Geometry”中单击“Apply”按钮。

7）单击对象“Frictionless Support 3”，选择 *Z* 向坐标为 0 的面，在“Geometry”中单击“Apply”按钮。

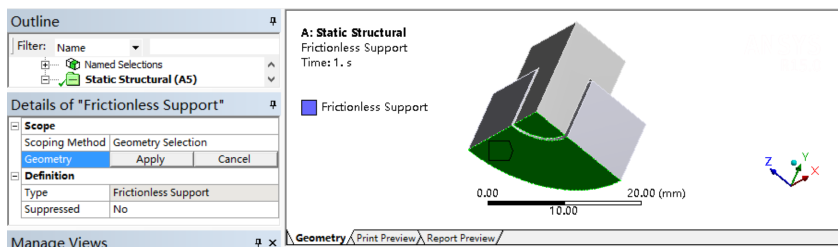
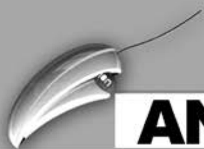


图 8-24 设置 Frictionless Support 对象

8）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Bolt Pretension”，如图 8-25 所示，此时在树结构图中会出现“Bolt Pretension”对象。

9）单击“Pretension”对象，选择圆柱面，在“Geometry”中单击“Apply”按钮，并设置“100N”的载荷，设置细节如图 8-26 所示，设置结果如图 8-27 所示。



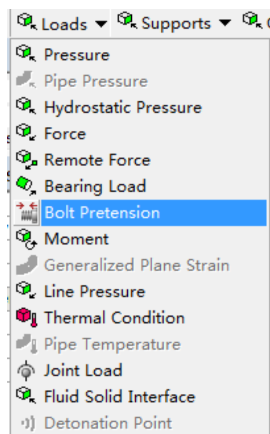


图 8-25　添加 Bolt Support 对象

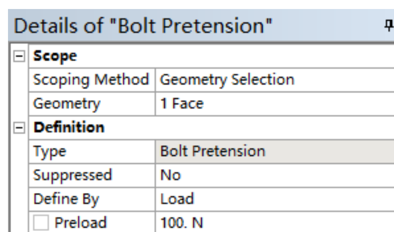


图 8-26　预紧力设置

10）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项查看设置。通过以上设置得到的边界条件如图 8-28 所示。

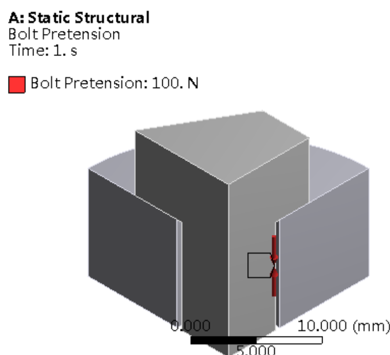


图 8-27　预紧力设置结果

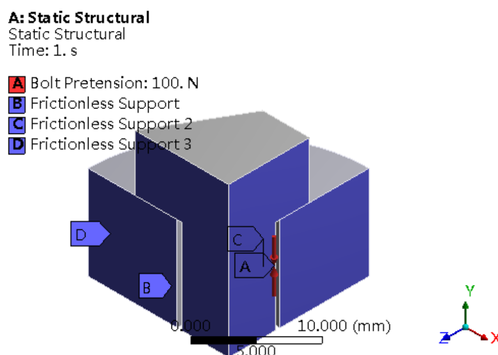


图 8-28　边界条件设置效果

8.2.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

8.2.3 后处理

1．查看整体响应

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

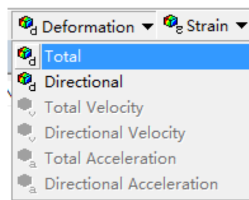


图 8-29　添加变形图

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，如图 8-29 所示，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口“Geometry”

选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，如图 8-30 所示，此时进行求解，求解后得到的变形云图如图 8-31 所示。

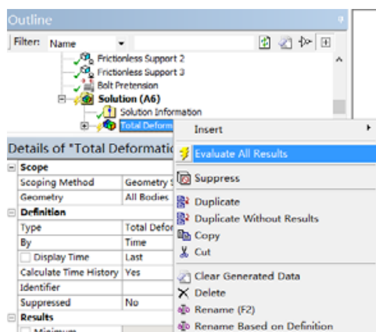


图 8-30　求解变形图

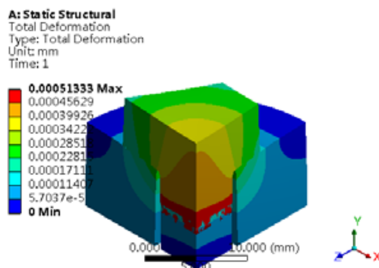


图 8-31　变形云图

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，如图 8-32 所示，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Equivalent Stress”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，如图 8-33 所示，此时进行求解，求解后得到的应力云图如图 8-34 所示。

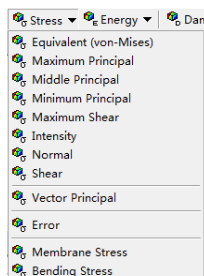


图 8-32　添加应力图

2. 查看接触结果

1）选择 Solution 工具栏中的“Tools”→“Contact Tool”，如图 8-35 所示，或右击 Solution 对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Contact Tool”，向 Outline 树结构图中添加一个 Contact Tool 对象。

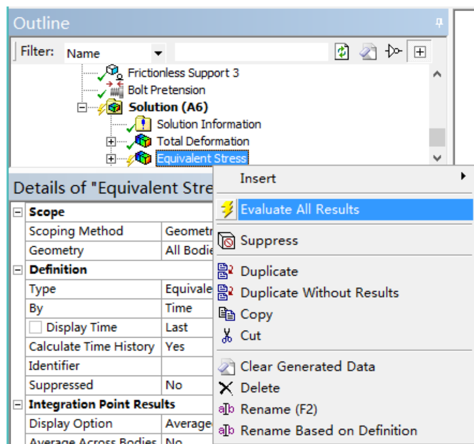


图 8-33　求解应力图

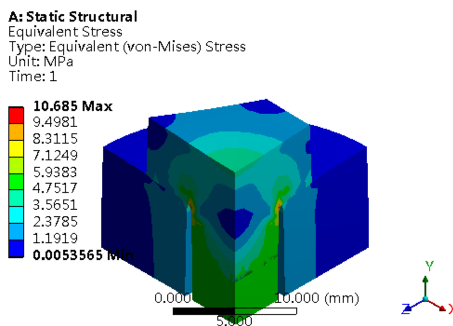


图 8-34　应力云图



2）右击 Contact Tool 对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Status”，如图 8-36 所示，此时在树结构图中会出现“Status”选项。

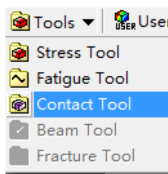


图 8-35　添加接触工具

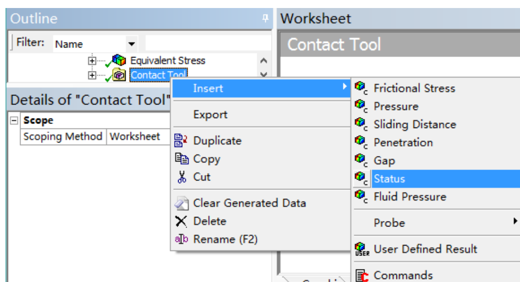


图 8-36　添加接触状态

3）右击 Contact Tool 对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Pressure”，此时在树结构图中会出现“Pressure”选项。

4）在 Outline 树结构图“Status”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的图形如图 8-37 和图 8-38 所示。

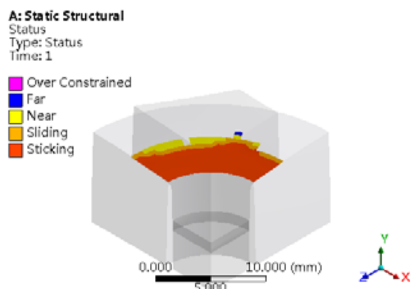


图 8-37　接触状态

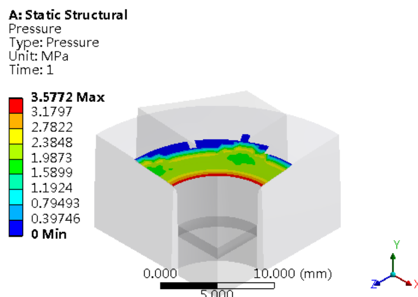


图 8-38　接触压力

3．保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 8-39 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。



图 8-39　完成分析后的项目工程图

8.3　本章小结

本章介绍了在 ANSYS Workbench 中进行接触分析的流程，主要介绍了接触的设置和接触结果的查看。接触在很多时候需要考虑，合理地设置接触是准确求解的保障。本章介绍的知识性内容较为简略，如需详细的理论介绍请参考帮助文档和有关书籍。

第 9 章　特征值分析

屈曲是一种结构失稳的情况，一旦发生将造成不可预测的后果，在工程应用中必须对其加以考虑。屈曲问题在工程中很常见，为保证结构能够可靠工作，需要进行专门的分析。ANSYS Workbench 提供了特征值分析的解决方案，本章将对其进行介绍，主要内容为特征值分析的流程。

学习目标：

- 理解进行线性特征值分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行特征值分析。

9.1　概述

静力分析方法认为杆件的破坏与否取决于材料的强度，当杆件承受的应力小于其许用应力时，杆件便可安全工作，但这对于细长受压杆件并不一定正确。压杆在承受的应力小于其许用应力时，便会发生变形而失去承载能力。这类问题称为压杆屈曲问题，或者压杆失稳问题。

工程中许多细长构件（如发动机中的连杆、液压缸中的活塞杆和订书机中的订书针等）和其他受压零件（如承受外压的薄壁圆筒等），在工作的过程中，都面临着压杆屈曲的问题。

临界载荷是受压杆件承受压力时保持杆件形状的载荷上限。压杆承受临界载荷或更大载荷时会发生弯曲，如图 9−1 所示。经典材料力学使用 Euler 公式求取临界载荷：

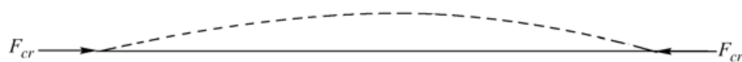


图 9−1　临界载荷下压杆发生屈曲

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2}$$

该公式在长细比超过 90 时有效。针对不同的压杆约束形式，参数 μ 的取值见表 9−1。

表 9−1　常见的压杆失稳计算参数取值

约束情况	一端固定 一端自由	一端固定 一端铰支	两端铰支	两端固定	两端固定 一端可横向移动
μ	2	0.7	1	0.5	1

对于压杆屈曲问题，ANSYS 中一方面可以使用线性分析方法求解 Euler 临界载荷，另一方面可以使用非线性方法求取更为安全的临界载荷。

ANSYS Workbench 提供了两种技术来分析屈曲问题，分别为非线性特征值分析法和线性特征值分析法（也称为特征值法）。因两种方法的结果可能截然不同（图 9-2），故需要理解它们的差异：

1）非线性特征值分析法通常较线性特征值分析法更符合工程实际，其使用载荷逐渐增大的非线性静力学分析来求解破坏结构稳定的临界载荷。使用非线性特征值分析法，甚至可以分析屈曲后的结构变化模式。

2）线性特征值分析法可以求解理想线性弹性结构的临界载荷，其结果与 Euler 方程求得的基本一致。

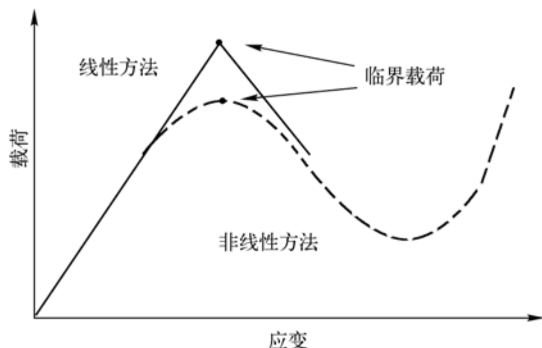


图 9-2　不同分析方法的特征值分析结果

9.2　特征值分析过程

特征值分析包括线性特征值分析和非线性特征值分析，下面分别介绍这两种分析的操作过程。

9.2.1　线性特征值分析过程

由于线性特征值分析是基于线性弹性理想结构的假设进行分析，所以该方法的结果安全性不佳，因此在设计中不宜直接采用分析结果。线性特征值分析包含以下步骤：

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）进行线性静力分析求解。

11）进行线性特征值分析求解。

12）查看结果。

13）保存并退出。



进行线性特征值分析时需要注意：

1）首先必须进行线性静力结构分析。

2）线性静力分析中施加的载荷是线性特征值分析施加载荷的基础。

3）在查看非线性特征值分析时，应将获得的放大倍数与线性结构分析使用的载荷的幅值相乘，这样得到的才是线性屈曲的临界载荷。

9.2.2 非线性特征值分析过程

非线性特征值分析本质上为非线性几何结构分析。进行非线性特征值分析操作的基本过程包括：

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

需要注意的事项如下。

1. 打开大变形选项

进行非线性特征值分析时，应注意设置分析选项，将大变形选项打开。

2. 施加扰动载荷

为了使屈曲发生，需要在与主要载荷不同的方向上施加扰动载荷。

3. 设置载荷子步的时间步长

由于使用非线性屈服分析方法是逐渐增大载荷直到结果开始发散，如果载荷增量过大，得到的分析结果可能不准确。打开二分法选项和自动时间步长选项有利于避免这样的问题。

打开自动时间步长选项时，程序自动求出屈服载荷。在求解时，一旦时间步长设置过大导致结果不收敛，程序将自动二分载荷步长，在小的步长下继续求解，直到能获得收敛结果。在特征值分析中，当载荷大于等于屈曲临界载荷时，结果将不收敛。一般而言，程序将收敛到临界载荷。

9.3 特征值分析示例

本节将通过对一端固定、一端自由的梁进行线性特征值分析和非线性特征值分析，来说明两种分析的具体操作过程。

9.3.1 前处理

1．创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A。

3）在工具箱中的“Analysis System”→“Eigenvalue Buckling”上按住鼠标左键并拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Solution”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B，此时相关联项的数据可共享。

4）在工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”上按住鼠标并左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Model”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 C，此时相关联项的数据可共享，如图 9-3 所示。

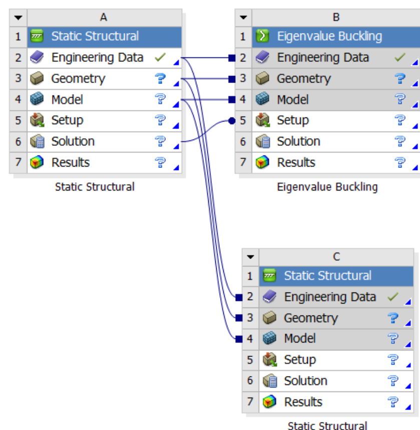


图 9-3 分析项目

2．定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row2:Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3．添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”命令，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap09”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的?变为✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A3 栏“Geometry”，进入到 DM 界面，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4．定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作，如图 9-4 所示。

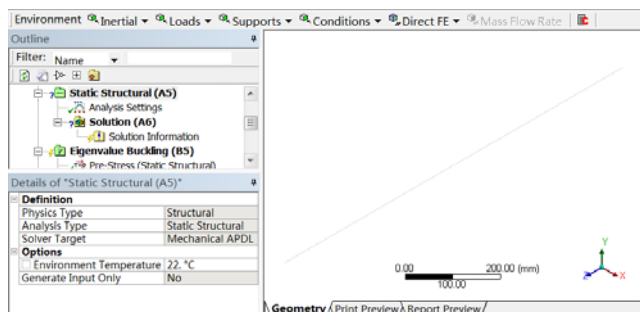


图 9-4　Mechanical 界面

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Line Body”，此时即可在 Details of“Line Body”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表“Material”下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中去。此时树结构图 Geometry 前的?变为✔，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5．划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上右击，选择“Insert”→“Sizing”，如图 9-5 所示，然后选择待划分的线体，在细节窗口“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为 10mm，如图 9-6 所示。

3）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，最终的网格模型如图 9-7 所示。

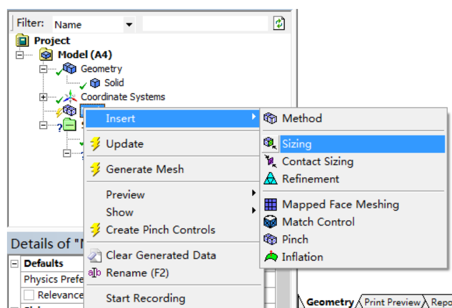


图 9-5　添加局部单元尺寸

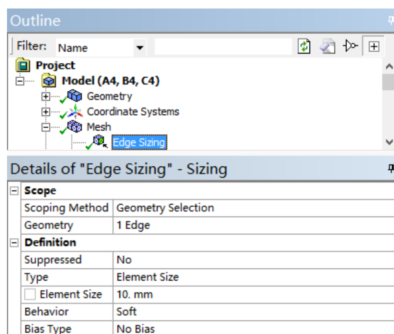


图 9-6　设置划分尺寸

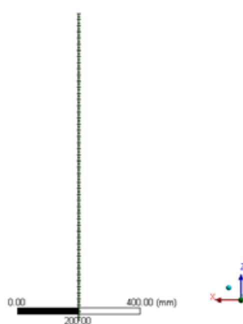


图 9-7　网格模型

6．定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选中“Fixed Support”，选择一个顶点（*z* 坐标为 0 的顶点），单击 Details of“Fixed Support”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束，如图 9-8 所示。

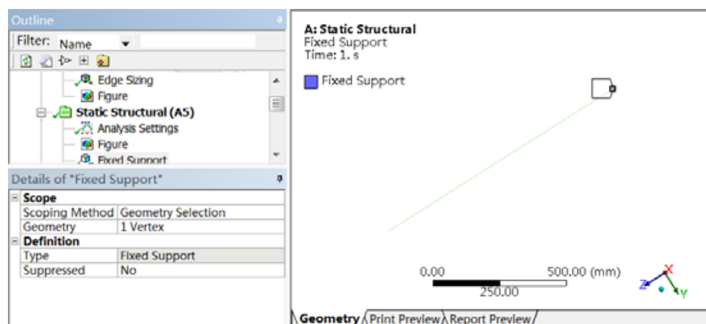


图 9-8　设置固定约束

4）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

5）选中“Force”，选择需要施加力的另一个顶点，单击 Details of “Force”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置参数如图 9-9 所示。该设置施加了 *Z* 向大小为 1N 的力。

6）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Displacement”选项。

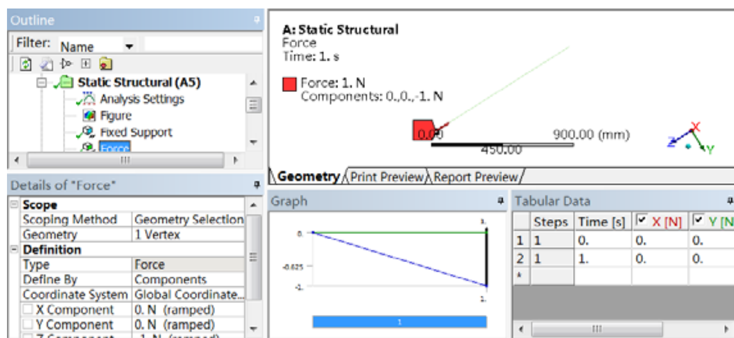


图 9-9　施加力

7）选中“Displacement”，选择整个线体，单击 Details of“Displacement”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可施加位置约束。此时设置 *Y* 向的位移为 0，如图 9-10 所示。

8）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，查

看得到的边界条件，如图 9-11 所示。

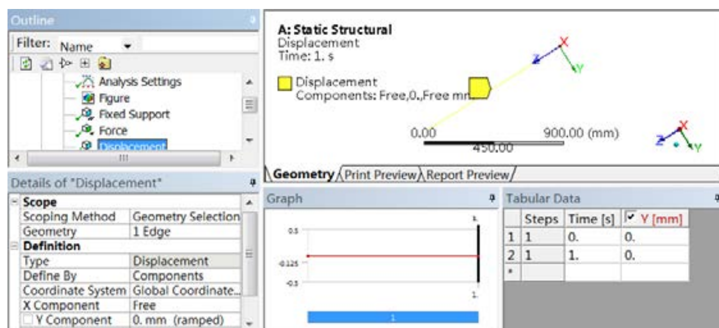


图 9-10　限制 *Y* 向位移为 0

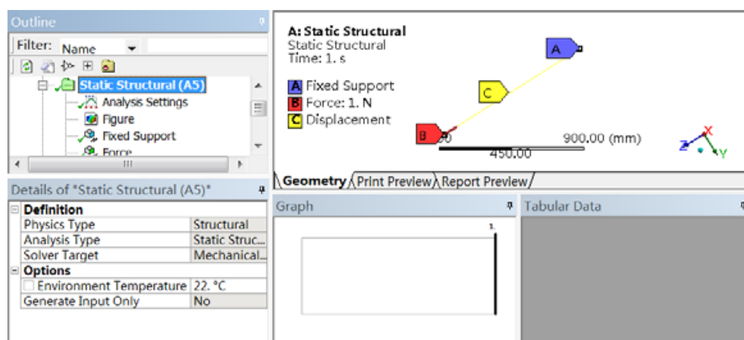


图 9-11　边界条件示意图

9.3.2　线性静力分析求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

9.3.3　线性特征值分析求解与后处理

1．求解设置与求解

1）单击 B5 中的“Analysis Settings”，在细节窗口中设置“Max Modes to Find”为“6”，如图 9-12 所示。

2）在 Outline 树结构图“Linear Buckling（B5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息，在图形区域得到的结果如图 9-13 所示。

3）单击“Solution Information”后，单击工具栏 Worksheet 查看求解得到结果，如图 9-14 所示。

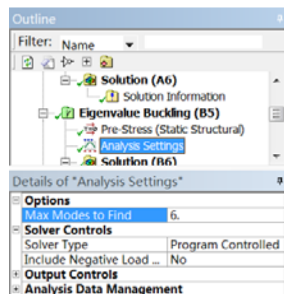
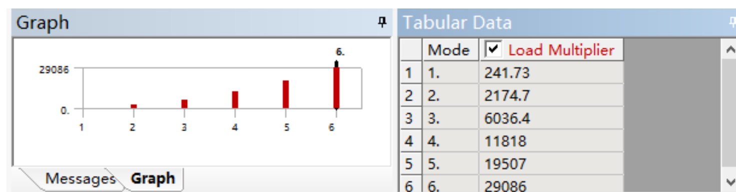


图 9-12　设置线性特征值分析求解



	Mode	Load Multiplier
1	1.	241.73
2	2.	2174.7
3	3.	6036.4
4	4.	11818
5	5.	19507
6	6.	29086

图 9-13　线性特征值分析求解结果（一）

Worksheet

Type	Data Type	Data Style	Component	Expression	Output Unit
R	Nodal	Scalar	X	RX	Angle
R	Nodal	Scalar	Y	RY	Angle
R	Nodal	Scalar	Z	RZ	Angle
REULER	Nodal	Euler Angles	VECTORS	REULERVECT...	Angle
U	Nodal	Scalar	X	UX	Displacement
U	Nodal	Scalar	Y	UY	Displacement
U	Nodal	Scalar	Z	UZ	Displacement
U	Nodal	Scalar	SUM	USUM	Displacement
U	Nodal	Vector	VECTORS	UVECTORS	Displacement
BFE	Element Nodal	Scalar		BFE	Temperature
BEAM	Element Nodal	Scalar	DIRECT	BEAMDIRECT	Stress
BEAM	Element Nodal	Scalar	MIN_BENDING	BEAMMIN_B...	Stress
BEAM	Element Nodal	Scalar	MAX_BENDI...	BEAMMAX_B...	Stress
BEAM	Element Nodal	Scalar	MIN_COMBI...	BEAMMIN_C...	Stress
BEAM	Element Nodal	Scalar	MAX_COMBI...	BEAMMAX_C...	Stress
VOLUME	Elemental	Scalar		VOLUME	Volume
ENERGY	Elemental	Scalar	POTENTIAL	ENERGYPOTE...	Energy
ENERGY	Elemental	Scalar	KINETIC	ENERGYKINE...	Energy
STEN	Elemental	Scalar		STEN	Energy

图 9-14　线性特征值分析求解结果（二）

2．查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”命令，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

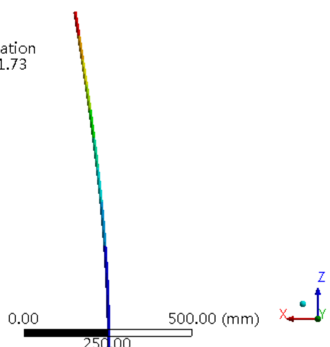
3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Total Deformation”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图 Total Deformation，并对其选项进行设置。设置参数见表 9-2。

表 9-2　变形等值线云图设置

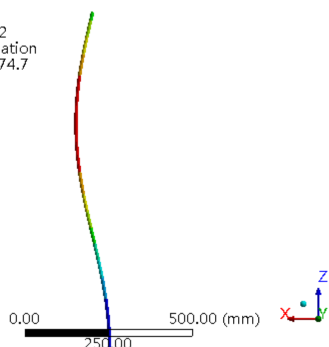
	Total Deformation	Total Deformation2	Total Deformation3	Total Deformation4	Total Deformation5	Total Deformation6
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection2	Geometry Selection3	Geometry Selection4	Geometry Selection5	Geometry Selection6
Geometry	All Bodies	All Bodies	All Bodies	All Bodies	All Bodies	All Bodies
Definition						
Type	Total Deformation	Total Deformation2	Total Deformation3	Total Deformation4	Total Deformation5	Total Deformation6
Mode	1	2	3	4	5	6

4）按照上面的方法，继续添加 Total Deformation 2～6，并按表 9-2 设置参数。

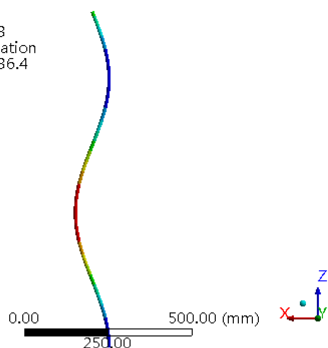
5）在 Outline 树结构图“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的屈曲模态图如图 9-15 所示。



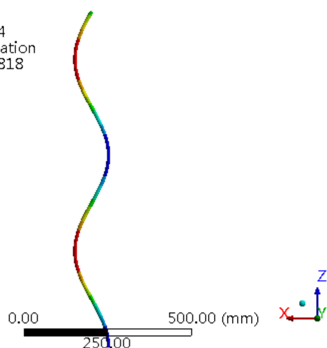
a)



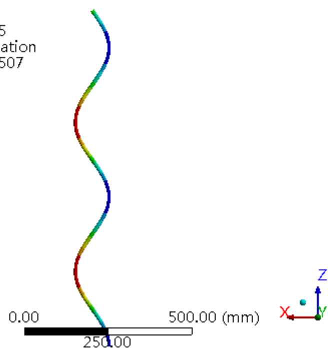
b)



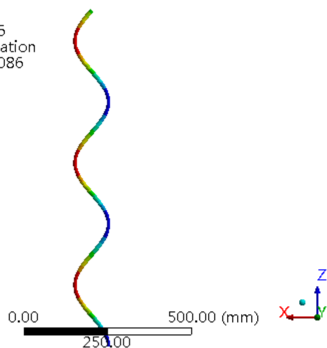
c)



d)



e)



f)

图 9-15 屈曲模态图

a) 第 1 阶屈曲模态 b) 第 2 阶屈曲模态 c) 第 3 阶屈曲模态

d) 第 4 阶屈曲模态 e) 第 5 阶屈曲模态 f)第 6 阶屈曲模态

9.3.4 非线性特征值分析求解与后处理

1．定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（C5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选中“Fixed Support”，选择一个顶点，单击 Details of“Fixed Support”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中顶点上施加位置约束。

4）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

5）选中“Force”，选择需要施加力的另一个顶点，单击 Details of “Force”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置参数，见表 9–3。该设置施加了 *Z* 向大小为“241.7N”的力。

6）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

7）选中“Force”，选择需要施加力的顶点，单击 Details of “Force2”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，设置“X Component”为 0.1N，*X* 向大小为“0.1N”的力，见表 9–3。

表 9–3　载荷设置

	Force	Displacement	Force2
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection
Geometry	1 Vertex	1 Edge	1 Vertex
Type	Force	Displacement	Force
Suppressed	No	No	No
Define By	Components	Components	Components
Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0.N(ramped)	Free	0.1N(ramped)
Y Component	0.N(ramped)	0.mm(ramped)	0.N(ramped)
Z Component	−241.7N(ramped)	Free	0.N(ramped)

8）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Displacement”选项。

9）选中“Displacement”，选择整个线体，单击 Details of “Displacement”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可施加位置约束。此时设置 *Y* 向的位移为“0.N”，见表 9–3。

10）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（C5)”选项，得到的边界条件如图 9–16 所示。

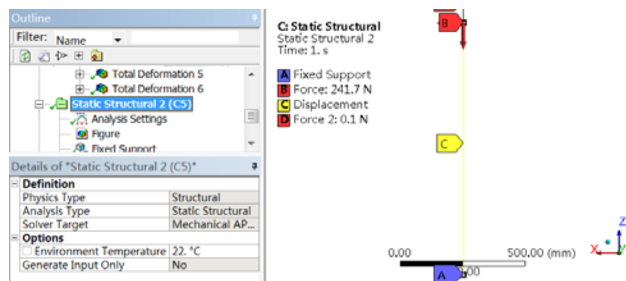
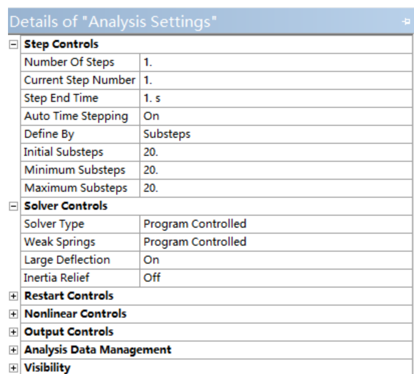


图 9–16　边界条件示意图

2．分析选项设置

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项，在 Analysis Settings 的细节窗口中设置“Large Deflection”为“On”，并设置其他参数如图 9-17 所示。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	20.
Minimum Substeps	20.
Maximum Substeps	20.
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

图 9-17 分析选项设置

3．求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（C5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

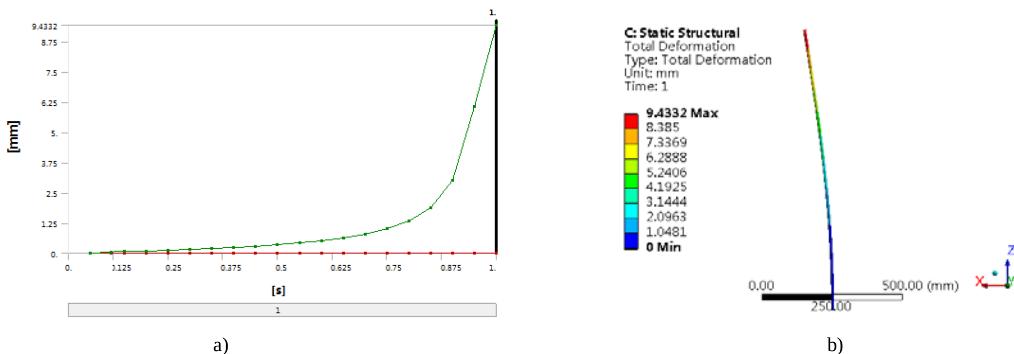
4．查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（C6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Total Deformation”细节窗口“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体变形结果如图 9-18 所示。



a)　　b)

图 9-18 整体变形结果

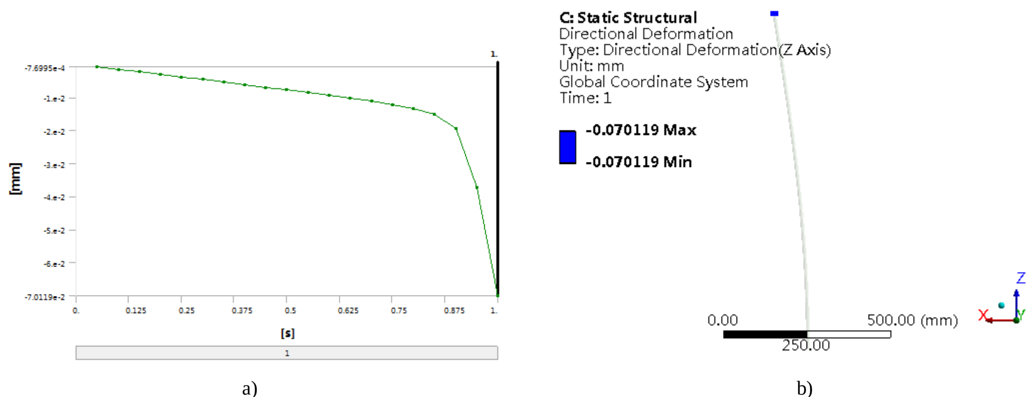
a) 整体变形数据图　b) 整体变形云图

5）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（C6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

6）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构图中会出现“Directional Deformation”对象。

7）设置 Directional Deformation 对象细节窗口中的“Orientation”为“Y Axis”，并选择施加力的顶点，然后在“Geometry”行单击“Apply”按钮。

8）在 Outline 树结构图“Directional Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 *Y* 向变形结果如图 9-19 所示。



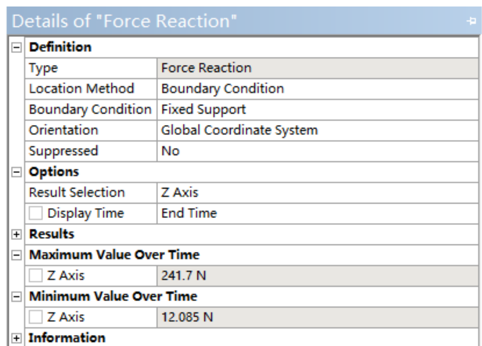
a)　　　　　　　　　　b)

图 9-19　*Y* 向变形结果

a) *Y* 变形数据图　b) 整体变形图

9）选择 Solution 工具栏中的“Probe”→“ForceReaction”，此时在树结构图中会出现“Force Reaction”对象。

10）设置 Force Reaction 对象的细节窗口如图 9-20 所示。



Details of "Force Reaction"

Definition	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
Options	
Result Selection	Z Axis
Display Time	End Time
Results	
Maximum Value Over Time	
Z Axis	241.7 N
Minimum Value Over Time	
Z Axis	12.085 N
Information	

图 9-20　Force Reaction 对象设置

11）在 Outline 树结构图中的“Force Reaction”对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的反作用力时间历程曲线如图 9-21 所示。

12）选择“Solution”，在工具栏中单击“New Chart and Table”按钮，此时在 Outline 树结构图中出现“Chart”对象。

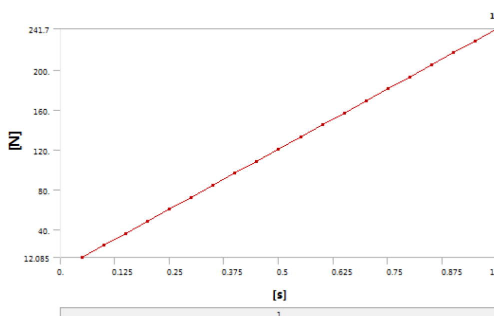


图 9–21 反作用力时间历程曲线

13）设置 Chart 对象的细节窗口如图 9–22 所示，得到的力–位移曲线如图 9–23 所示。

Details of "Chart"

Definition	
Outline Selection	2 Objects
Chart Controls	
X Axis	Directional Deformation (Max)
Plot Style	Both
Scale	Linear
Gridlines	None
Axis Labels	
X-Axis	displacement
Y-Axis	force
Report	
Content	Chart And Tabular Data
Caption	
Input Quantities	
Time	Omit
Output Quantities	
[A] Directional Deformation (Min)	Omit
Directional Deformation (Max)	X Axis
[B] Force Reaction (Z)	Display

图 9–22 Chart 对象细节窗口

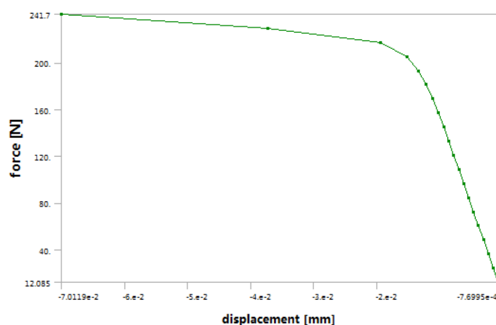


图 9–23 力–位移曲线

5．保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 9–24 所示。

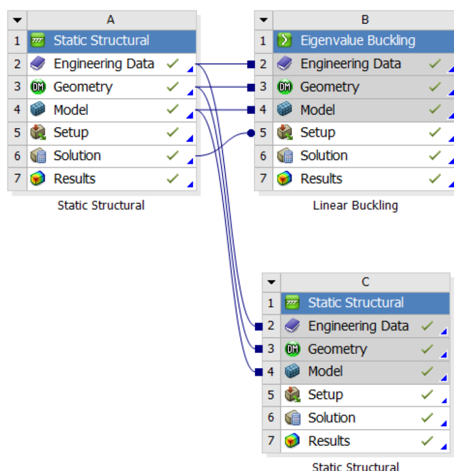


图 9–24 完成的分析项目工程图

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

9.4 本章小结

本章介绍了特征值分析的相关内容，主要内容包括：线性特征值分析的方法和实现步骤、非线性特征值分析的方法和实现步骤。特征值分析在受压构件的分析中非常有用，常用来验证受压构件的结构稳定性。本章只介绍了在 ANSYS Workbench 中实现特征值分析的基本方法，并未涉及相关的理论知识，用户在需要时，可参考相关文献和 ANSYS Workbench 帮助文档来获得对分析结果更好的理解。



第10章 瞬 态 分 析

瞬态动力学响应是工程中关注的问题。瞬态分析可以确定承受任意的随时间变化载荷结构的动力学响应。因此，可用其分析确定结构在静载荷、瞬态载荷和简谐载荷随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力及作用力情况，帮助设计人员更好地模拟结构承受实际工况时的响应情况。

学习目标：

- 理解进行瞬态分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行瞬态分析。

10.1 瞬态分析基础

10.1.1 瞬态分析概述

相对于谐响应分析，瞬态分析以计算开始激励时发生的瞬态振动为主。相对于静态分析，瞬态分析需要进行更多的计算以得到时间历程下结构的响应情况。为了提高计算效率，通常进行如下准备工作。

1）简化模型，越简单的模型越能节省求解时间，提高工作效率。措施包括使用更多的梁单元和集中质量。

2）如果分析中包含非线性，可以通过进行静力学分析尝试了解非线性特性如何影响结构的响应，而有时候，在动力学分析中不必包括非线性也可以很好地模拟实际工况。

3）通过模态分析计算结构的固有频率和振型，即可了解这些模态被激活时结构如何响应。固有频率同样也对计算正确的积分时间步长有用。

4）对于非线性问题，考虑提取模型中的线性部分的子模型进行分析。

在瞬态分析中，载荷和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较显著，如果惯性力和阻尼作用不重要，即可用静力学分析代替瞬态分析。下面简单介绍瞬态分析有关的理论。

1．假设与限制

进行瞬态分析必须满足下列假设和限制。

1）初始条件已知。

2）必要的时候可以使用施加科氏力。

2．瞬态响应相关理论

二阶结构系统一般的运动方程可以反映瞬态动力学特征，如下所示：

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}\}=\{\boldsymbol{F}^a\}$$

式中 $[\boldsymbol{M}]$——结构质量矩阵；

$[\boldsymbol{C}]$——结构阻尼矩阵；

$[\boldsymbol{K}]$——结构刚度矩阵；

$\{\boldsymbol{F}^a\}$——外加载荷向量；

$\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}$——节点加速度向量；

$\{\dot{\boldsymbol{u}}\}$——节点速度向量；

$\{\boldsymbol{u}\}$——节点位移向量。

假设

$$\{\dot{\boldsymbol{u}}_{n+1}\}=\{\dot{\boldsymbol{u}}_n\}+[(1-\delta)\{\ddot{\boldsymbol{u}}_n\}+\delta\{\ddot{\boldsymbol{u}}_{n+1}\}]\Delta t$$

$$\{\boldsymbol{u}_{n+1}\}=\{\boldsymbol{u}_n\}+\{\dot{\boldsymbol{u}}_n\}\Delta t+\left[\left(\frac{1}{2}-\alpha\right)\{\ddot{\boldsymbol{u}}_n\}+\alpha\{\ddot{\boldsymbol{u}}_{n+1}\}\right]\Delta t^2$$

式中 α、δ——Newmark 时间积分常数；

Δt——时间间隔，满足 $\Delta t=t_{n+1}-t_n$；

$\{\boldsymbol{u}_n\}$——时间 t_n 处节点位移向量；

$\{\dot{\boldsymbol{u}}_n\}$——时间 t_n 处节点速度向量；

$\{\ddot{\boldsymbol{u}}_n\}$——时间 t_n 处节点加速度向量。

得到迭代方程式：

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}_{n+1}\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{u}}_{n+1}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}_{n+1}\}=\{\boldsymbol{F}^a\}$$

3．单元结果

网格单元内节点反力包括由于刚度、阻尼和质量效应分别带来的惯性力、阻尼力和变形力，计算方式分别如下所示：

（1）惯性力

$$\{\boldsymbol{F}^m\}_{\mathrm{e}}=[\boldsymbol{M}]_{\mathrm{e}}\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}_{\mathrm{e}}$$

式中 $\{\boldsymbol{F}^m\}_{\mathrm{e}}$——单元内节点承受的惯性力；

$[\boldsymbol{M}]_{\mathrm{e}}$——单元质量矩阵；

$\{\boldsymbol{u}_1\}_{\mathrm{e}}$——单元节点位移实部矩阵；

$\{\boldsymbol{u}_2\}_{\mathrm{e}}$——单元节点位移虚部矩阵。

（2）阻尼力

$$\{\boldsymbol{F}^c\}_{\mathrm{e}}=[\boldsymbol{C}]_{\mathrm{e}}\{\dot{\boldsymbol{u}}\}_{\mathrm{e}}$$

式中 $\{\boldsymbol{F}^c\}_{\mathrm{e}}$——单元内节点承受的阻尼力；

$[\boldsymbol{C}]_{\mathrm{e}}$——单元阻尼矩阵。

（3）变形力

$$\{\boldsymbol{F}^k\}_{\mathrm{e}}=[\boldsymbol{K}]_{\mathrm{e}}\{\boldsymbol{u}\}_{\mathrm{e}}$$

式中 $\{\boldsymbol{F}^k\}_{\mathrm{e}}$——单元内节点承受的变形力。

10.1.2 瞬态分析过程

瞬态分析的步骤如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

在分析中应注意阻尼参数的设置，其对分析结果的影响非常大。

10.2 瞬态分析示例

本节对瞬态分析的操作流程进行示例。

10.2.1 前处理

在Windows操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS”，本节将通过对汽车主轴的瞬态动力学分析让读者掌握瞬态动力学分析的基本过程，本示例的模型建立请参照前面的章节，在进行分析时直接导入即可。

10.2.2 问题描述

汽车主轴是由 4 部分组成的，两个主轴通过两个转轴销结合在一起，如图 10−1 所示。转轴一端传递载荷，可以认为一端受力，而另一端为全约束。

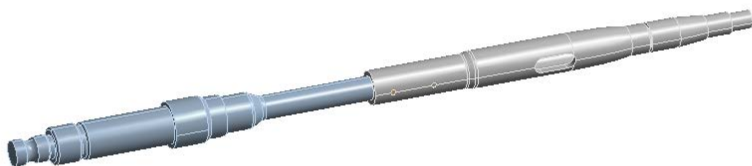


图 10−1 几何模型

10.2.3 基础操作

关于启动ANSYS Workbench、单位的设置、模型导入、添加材料等操作简单介绍如下。

步骤 01 在主界面中建立分析项目，建立的项目包括几何模型项目 A、瞬态动力学分析项目 B，如图 10-2 所示。

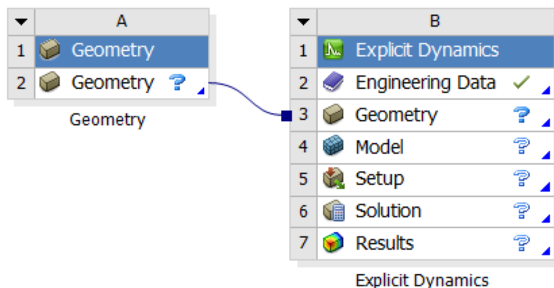


图 10-2 创建分析项目

步骤 02 在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”命令，在弹出的对话框中选择需要导入的模型文件“char10-01.igs”。

步骤 03 双击 B2 栏进入“Engineering Data”（材料数据）界面，添加系统自带的材料 Structal Steel，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

步骤 04 双击 A2 栏进入到 DM 中，设置其单位为“Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）”。在模型设计树中右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate”命令，即可显示生成的几何体，如图 10-3 所示，可在几何体上进行其他的操作。

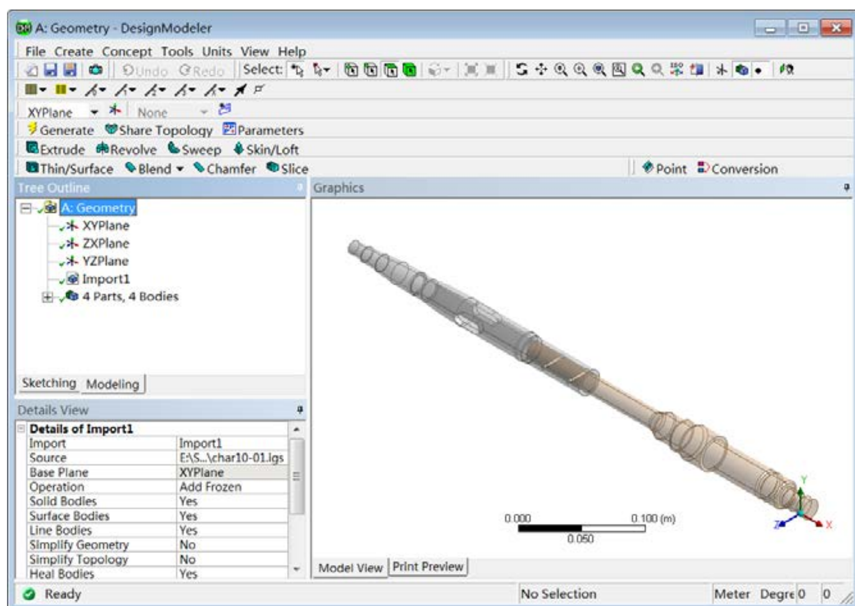


图 10-3 DM 操作界面

10.2.4 添加材料特性

步骤 01 双击项目管理区中项目 B 的 B4 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，在该界面

下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作，如图 10-4 所示。

步骤02　在 Mechanical 界面中选择“Units”（单位）→“Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）”命令，设置分析单位，如图 10-5 所示。



此时分析树中“Geometry”前显示为问号?，表示数据不完全，需要输入完整的数据。

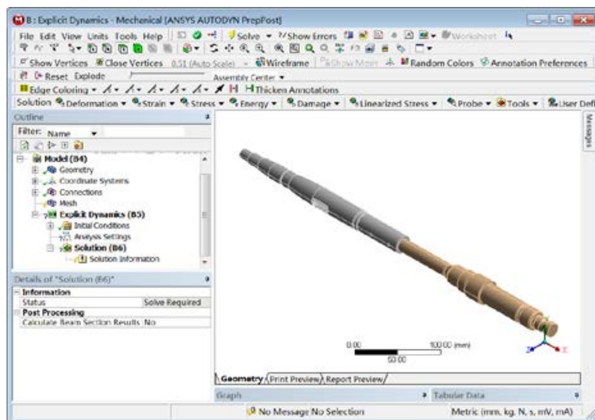


图 10-4　Mechanical 界面

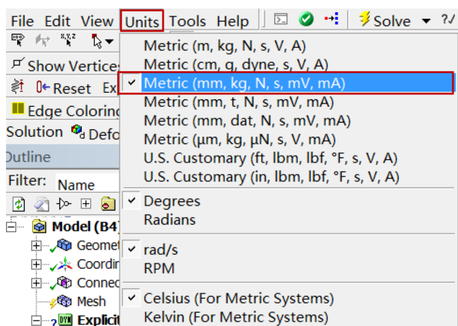


图 10-5　设置分析单位

步骤03　选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中“Geometry”选项下的“MSBR”，即可在 Details of“Multiple Selection”（参数列表）中给模型添加材料 Structural Steel，如图 10-6 所示。此时分析树中“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加完成。

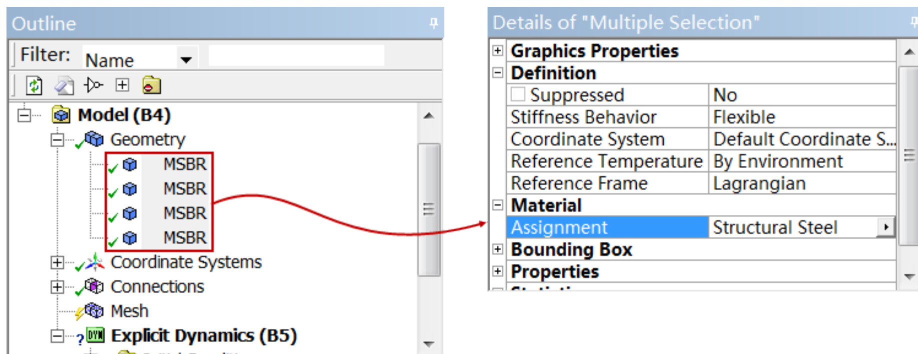


图 10-6　添加材料

10.2.5　创建坐标系

步骤01　选中分析树中的“Coordinate Systems”项，单击 Coordinate Systems 工具栏中的“新坐标系”按钮，为模型创建新坐标系，此时会在分析树中出现如图 10-7 所示的“Coordinate System”项。

步骤 02 单击〈F2〉快捷键，更改名称为“Cylindrical Coordinate System”，同时在参数设置列表中设置相关参数：“Type”为“Cylindrical”，“Axis”为“X”，“Define By”为“Global Z Axis”，如图 10-8 所示。

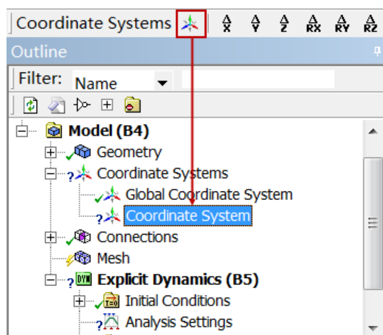


图 10-7 创建新坐标系

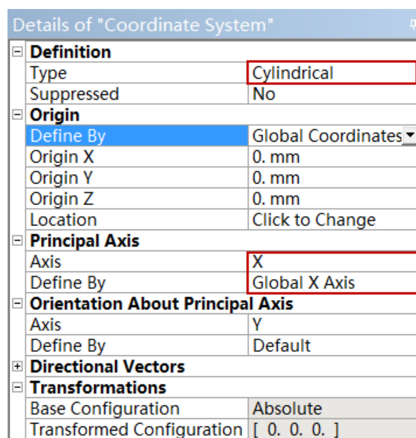


图 10-8 坐标系参数设置

10.2.6 划分网格

步骤 01 选中分析树中的“Mesh”项，单击 Mesh 工具栏中的“Mesh Control”（网格控制）→“Sizing”（尺寸）命令，为网格划分添加尺寸控制，此时会在分析树中出现如图 10-9 所示的“Sizing”项。

步骤 02 单击图形工具栏中的“选择体”按钮，然后执行菜单栏中的“Edit”（编辑）→“Select All”（选择所有）命令，选择所有的体，然后在参数列表中单击“Apply”按钮，并设置“Element Size”为“6.e-003m”，如图 10-10 所示。

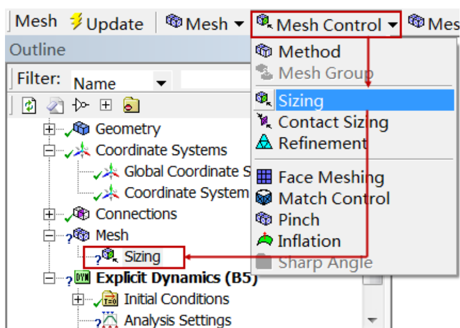


图 10-9 添加尺寸控制

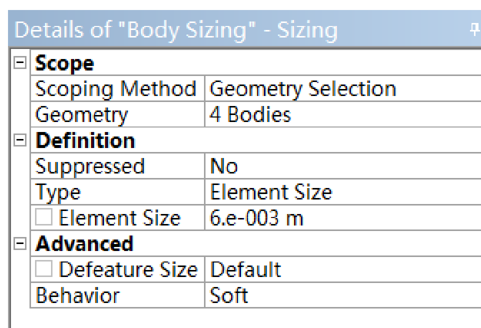


图 10-10 设置参数

步骤 03 在分析树中的“Mesh”分支下右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”（生成网格）命令，如图 10-11 所示，当弹出的进度条消失后，即可生成网格。最终生成的网格效果如图 10-12 所示。

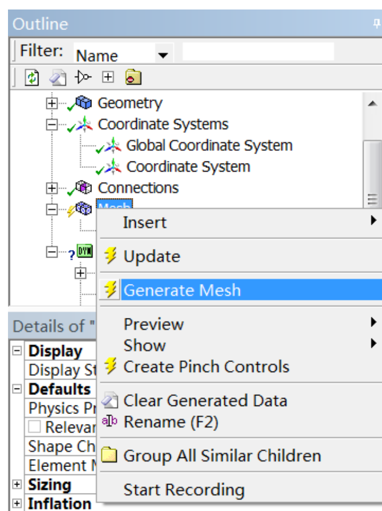


图 10–11　快捷菜单

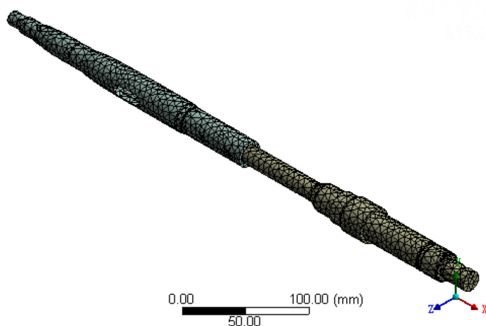


图 10–12　网格效果

10.2.7　施加载荷与约束

步骤 01　单击 Environment 工具栏中的“Supports”（约束）→“Fixed Support”（固定约束）命令，为模型添加约束，如图 10–13 所示。

步骤 02　在选择过滤器工具栏中单击“选择面”按钮，然后选择结构的一端端面为全约束，单击参数设置列表中的“Apply”按钮，即可将全约束施加到节点上，如图 10–14 所示。

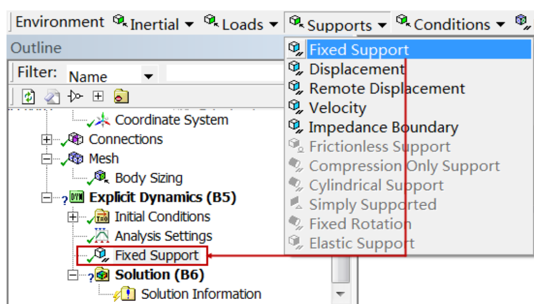


图 10–13　添加约束

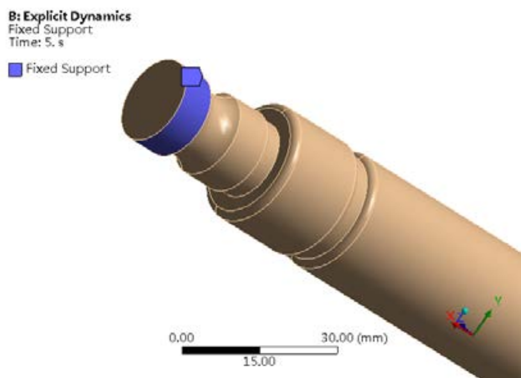


图 10–14　为端面施加约束

步骤 03　单击 Environment 工具栏中的“Loads”（载荷）→“Moment”（力矩）命令，为模型添加力矩载荷，如图 10–15 所示。

步骤 04　选择结构的另一端面，单击参数设置列表中的“Apply”按钮，并在“Define By”参数下选择“Components”，然后将“X Component”设置为“Tabular Data”，如图 10–16 所示。

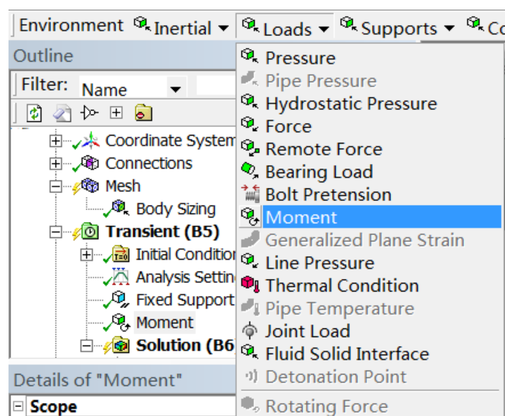
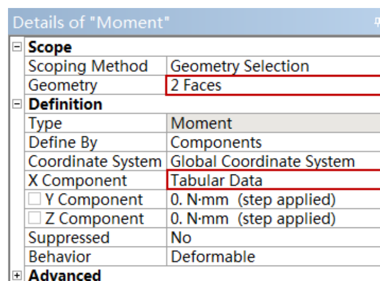


图 10-15　添加力矩载荷

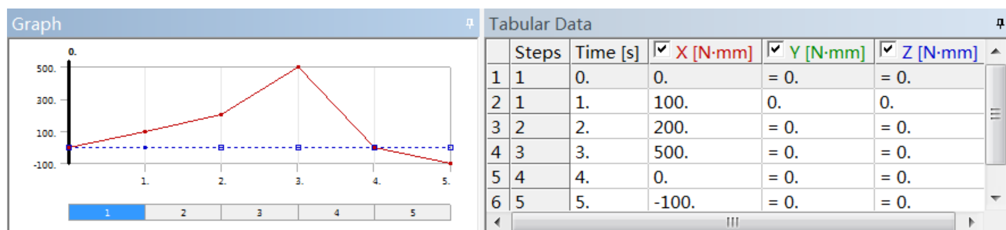


Details of "Moment"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
Type	Moment
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Tabular Data
Y Component	0. N·mm (step applied)
Z Component	0. N·mm (step applied)
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Advanced	

图 10-16　修改参数

步骤 05　在窗口右下方的 Tabular Data 参数设置列表中输入载荷值，此时即可将载荷施加到选中的面上，如图 10-17 所示，施加载荷后的效果如图 10-18 所示。



Tabular Data

	Steps	Time [s]	X [N·mm]	Y [N·mm]	Z [N·mm]
1	1	0.	0.	= 0.	= 0.
2	1	1.	100.	0.	0.
3	2	2.	200.	= 0.	= 0.
4	3	3.	500.	= 0.	= 0.
5	4	4.	0.	= 0.	= 0.
6	5	5.	-100.	= 0.	= 0.

图 10-17　输入载荷值

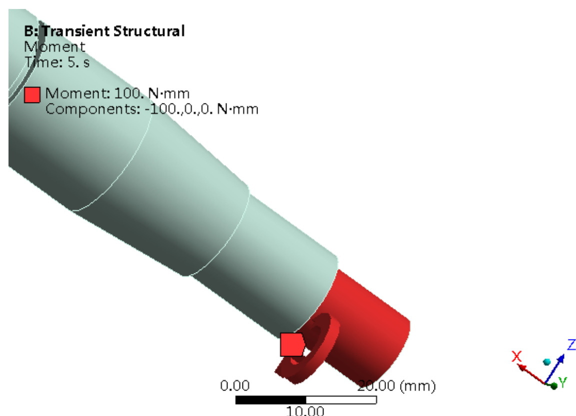


图 10-18　施加载荷

10.2.8　设置求解选项

步骤 01　选中分析树中的“Analysis Settings”项，并在 Options 下设置求解步控制。图 10-19 所示为第 1 步的设置，依次设置 5 步的求解控制，如图 10-20～图 10-23 所示。

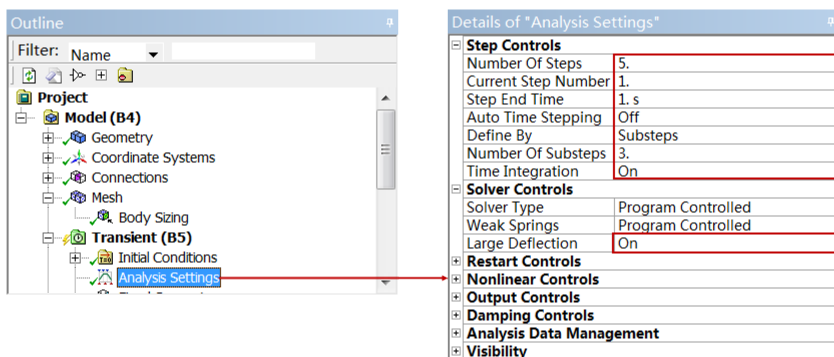


图 10-19　求解选项设置

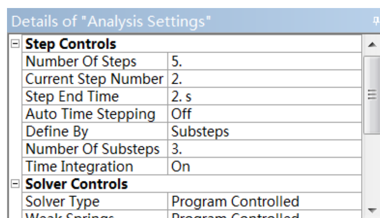


图 10-20　设置第 2 步

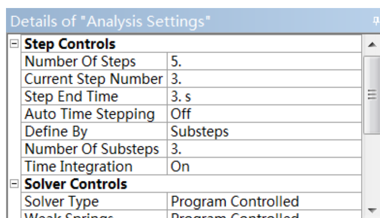


图 10-21　设置第 3 步

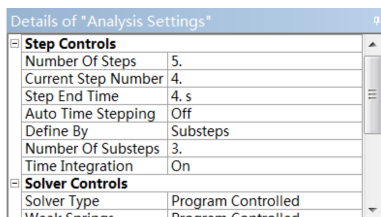


图 10-22　设置第 4 步

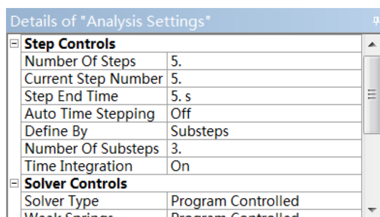


图 10-23　设置第 5 步

步骤 02　选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项，此时会出现如图 10-24 所示的 Solution 工具栏。

步骤 03　选择 Solution 工具栏中的“Stress”（应力）→“Equivalent（von-Mises）”命令，如图 10-25 所示，此时在分析树中会出现“Equivalent Stress”（等效应力）选项。

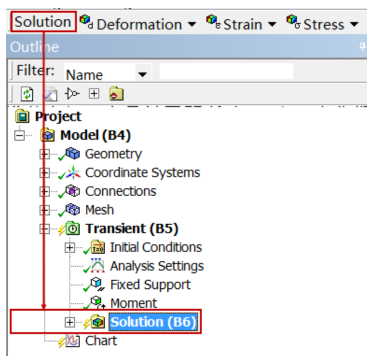


图 10-24　Solution 工具栏

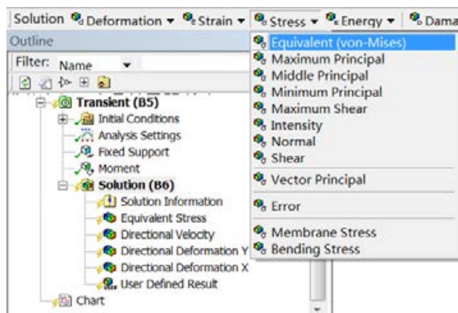


图 10-25　添加应力求解项

步骤04 选择 Solution 工具栏中的“Deformation”（变形）→“Directional Velocity”（方向速度）命令，如图 10-26 所示，此时在分析树中会出现“Directional Velocity”（方向速度）选项。在参数设置列表中设置各参数，如图 10-27 所示。

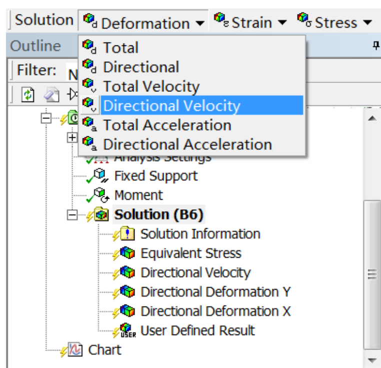


图 10-26 求解方向速度

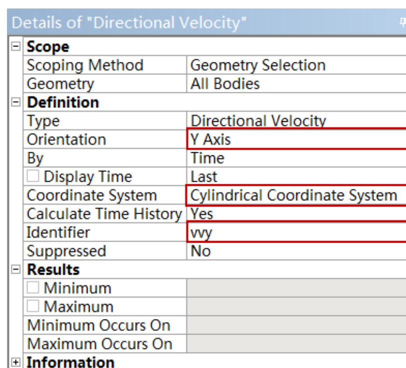


图 10-27 参数设置

步骤05 选择 Solution 工具栏中的“Deformation”（变形）→“Directional”（方向）命令，如图 10-28 所示，此时在分析树中会出现“Directional Deformation”（方向变形）选项，利用〈F2〉快捷键重新命名为“Directional Deformation Y”。在参数设置列表中设置各参数如图 10-29 所示。

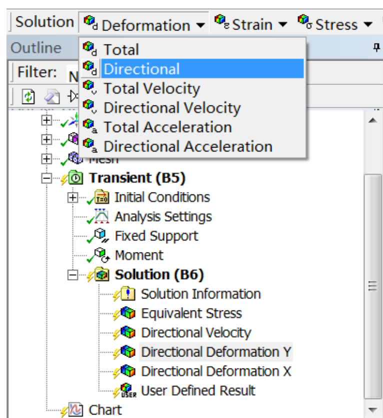


图 10-28 求解方向位移

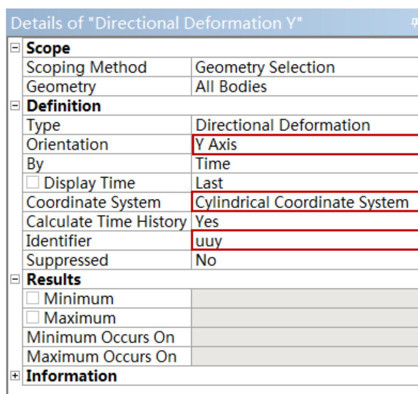


图 10-29 参数设置

步骤06 如同步骤⑤，选择 Solution 工具栏中的“Deformation”（变形）→“Directional”（方向）命令，此时在分析树中会出现“Directional Deformation”（方向变形）选项，利用〈F2〉快捷键重新命名为“Directional Deformation X”。在参数设置列表中设置各参数，如图 10-30 所示。

步骤07 如同步骤⑤，选择 Solution 工具栏中的“User Defined Result”（用户定义结果）命令，此时在分析树中会出现“User Defined Result”选项。在参数设置列表中设置各参数，如图 10-31 所示。

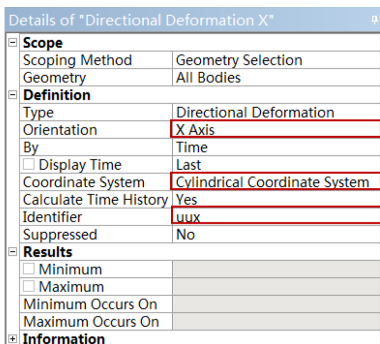


图 10-30 径向变形参数设置

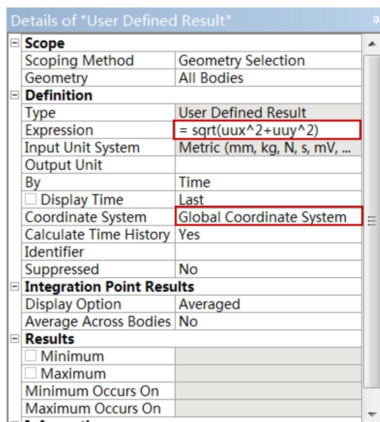


图 10-31 合成位移参数设置

步骤 08 单击求解工具栏中的“新图表”按钮，此时在分析树中会出现 Chart 图标，如图 10-32 所示，在参数设置列表中设置各参数，如图 10-33 所示。

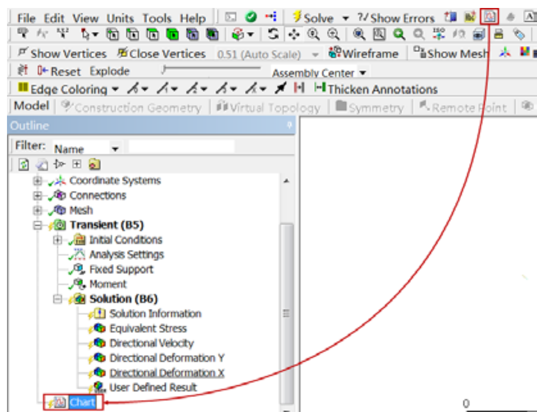


图 10-32 插入变量曲线

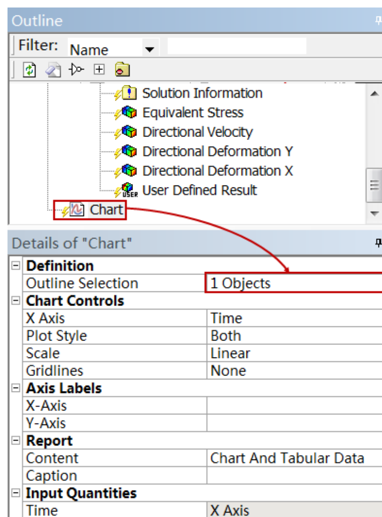


图 10-33 参数设置

10.2.9 求解并显示求解结果

步骤 01 单击求解工具栏中的“Solve”（求解）命令，如图 10-34 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

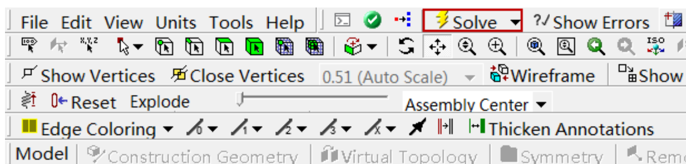


图 10-34 求解工具栏



步骤 02 应力分析云图：选择 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Equivalent Stress”选项，此时在图形窗口中会出现如图 10–35 所示的应力分析云图，最大、最小应力图表如图 10–36 所示。

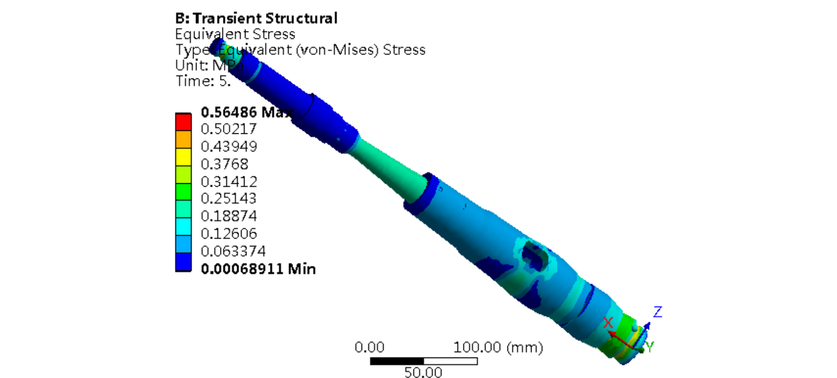
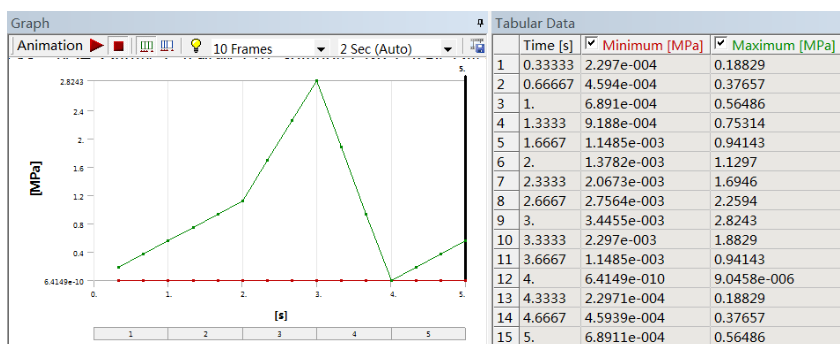


图 10–35　应力分析云图



	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1	0.33333	2.297e-004	0.18829
2	0.66667	4.594e-004	0.37657
3	1.	6.891e-004	0.56486
4	1.3333	9.188e-004	0.75314
5	1.6667	1.1485e-003	0.94143
6	2.	1.3782e-003	1.1297
7	2.3333	2.0673e-003	1.6946
8	2.6667	2.7564e-003	2.2594
9	3.	3.4455e-003	2.8243
10	3.3333	2.297e-003	1.8829
11	3.6667	1.1485e-003	0.94143
12	4.	6.4149e-010	9.0458e-006
13	4.3333	2.2971e-004	0.18829
14	4.6667	4.5939e-004	0.37657
15	5.	6.8911e-004	0.56486

图 10–36　最大、最小应力图表

步骤 03 周向速度云图：选择 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Directional Velocity”选项，此时在图形窗口中会出现如图 10–37 所示的周向速度分析云图，最大、最小周向速度图表如图 10–38 所示。

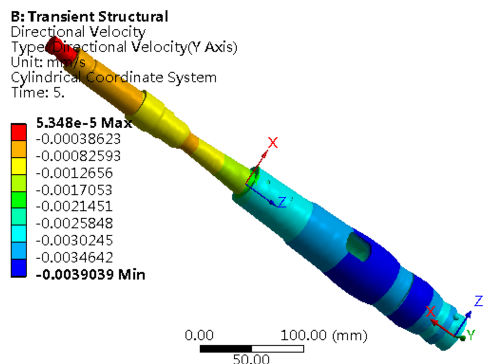
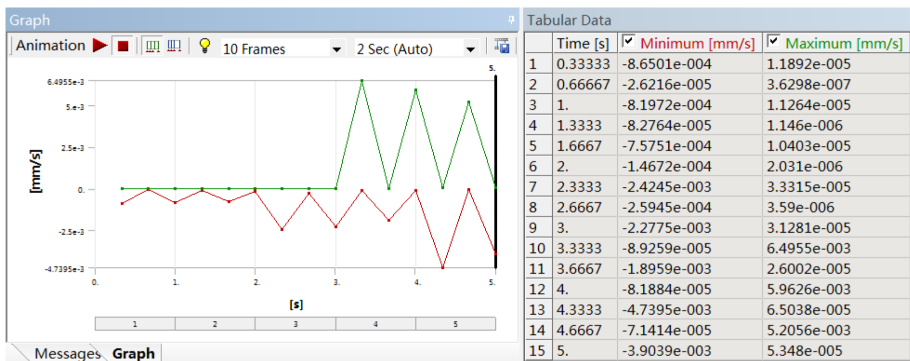


图 10–37　周向速度分析云图



	Time [s]	Minimum [mm/s]	Maximum [mm/s]
1	0.33333	-8.6501e-004	1.1892e-005
2	0.66667	-2.6216e-005	3.6298e-007
3	1.	-8.1972e-004	1.1264e-005
4	1.3333	-8.2764e-005	1.146e-006
5	1.6667	-7.5751e-004	1.0403e-005
6	2.	-1.4672e-004	2.031e-006
7	2.3333	-2.4245e-003	3.3315e-005
8	2.6667	-2.5945e-004	3.59e-006
9	3.	-2.2775e-003	3.1281e-005
10	3.3333	-8.9259e-005	6.4955e-003
11	3.6667	-1.8959e-003	2.6002e-005
12	4.	-8.1884e-005	5.9626e-003
13	4.3333	-4.7395e-003	6.5038e-005
14	4.6667	-7.1414e-005	5.2056e-003
15	5.	-3.9039e-003	5.348e-005

图 10-38　最大、最小周向速度图表

步骤04　周向位移（*Y* 轴方向）云图：选择 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Directional Deformation Y”选项，此时在图形窗口中会出现如图 10-39 所示的周向位移分析云图，最大、最小周向位移图表如图 10-40 所示。

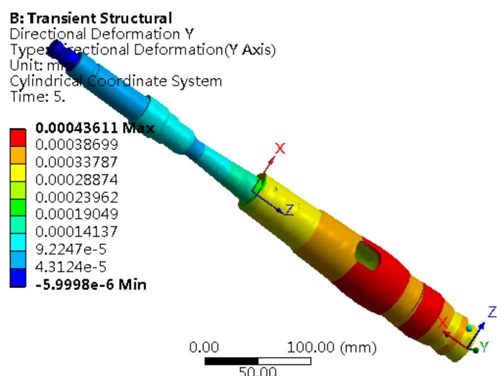
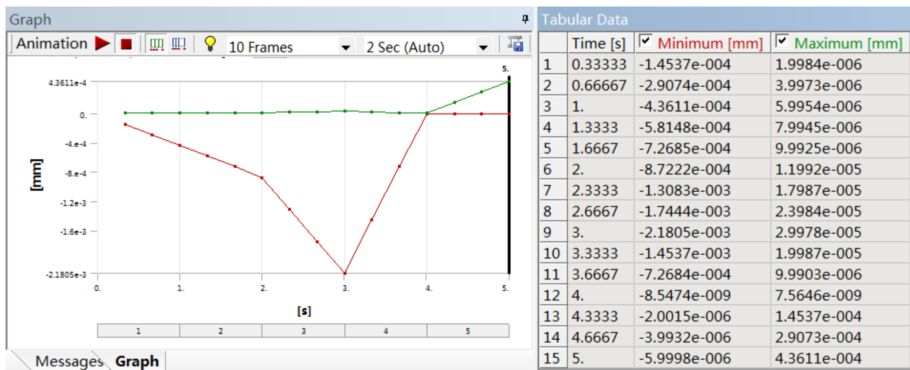


图 10-39　周向位移分析云图



	Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1	0.33333	-1.4537e-004	1.9984e-006
2	0.66667	-2.9074e-004	3.9973e-006
3	1.	-4.3611e-004	5.9954e-006
4	1.3333	-5.8148e-004	7.9945e-006
5	1.6667	-7.2685e-004	9.9925e-006
6	2.	-8.7222e-004	1.1992e-005
7	2.3333	-1.3083e-003	1.7987e-005
8	2.6667	-1.7444e-003	2.3984e-005
9	3.	-2.1805e-003	2.9978e-005
10	3.3333	-1.4537e-003	1.9987e-005
11	3.6667	-7.2684e-004	9.9903e-006
12	4.	-8.5474e-009	7.5646e-009
13	4.3333	-2.0015e-006	1.4537e-004
14	4.6667	-3.9932e-006	2.9073e-004
15	5.	-5.9998e-006	4.3611e-004

图 10-40　最大、最小周向位移图表

步骤05　径向位移（*X* 轴方向）云图：选择 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Directional Deformation X”选项，此时在图形窗口中会出现如图 10-41 所示的径

向位移分析云图，最大、最小径向位移图表如图 10-42 所示。

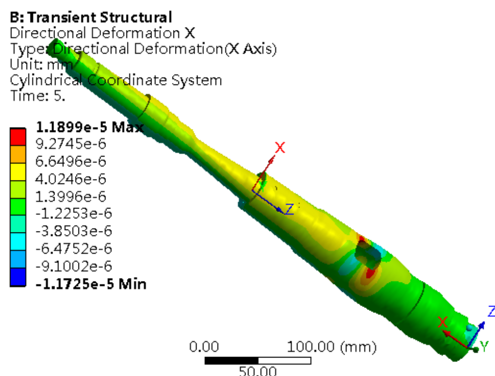
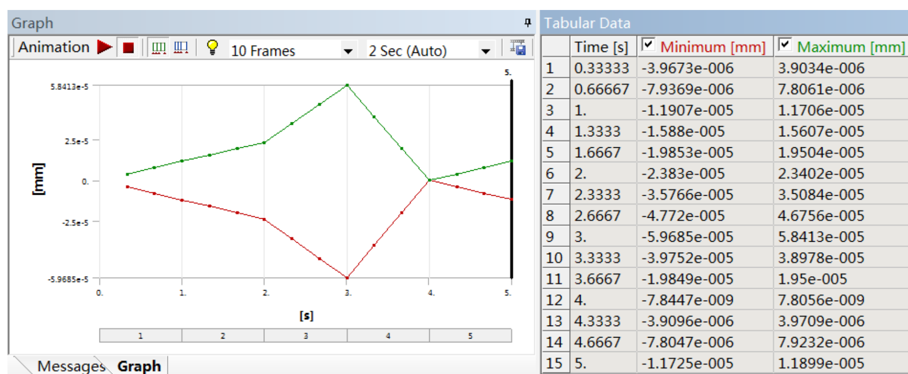


图 10-41　径向位移分析云图



	Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1	0.33333	-3.9673e-006	3.9034e-006
2	0.66667	-7.9369e-006	7.8061e-006
3	1.	-1.1907e-005	1.1706e-005
4	1.3333	-1.588e-005	1.5607e-005
5	1.6667	-1.9853e-005	1.9504e-005
6	2.	-2.383e-005	2.3402e-005
7	2.3333	-3.5766e-005	3.5084e-005
8	2.6667	-4.772e-005	4.6756e-005
9	3.	-5.9685e-005	5.8413e-005
10	3.3333	-3.9752e-005	3.8978e-005
11	3.6667	-1.9849e-005	1.95e-005
12	4.	-7.8447e-009	7.8056e-009
13	4.3333	-3.9096e-006	3.9709e-006
14	4.6667	-7.8047e-006	7.9232e-006
15	5.	-1.1725e-005	1.1899e-005

图 10-42　最大、最小径向位移图表

步骤 06 径向和周向合成位移云图：选择 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“User Defined Result”选项，此时在图形窗口中会出现如图 10-43 所示的合成位移分析云图，最大、最小合成位移图表如图 10-44 所示。

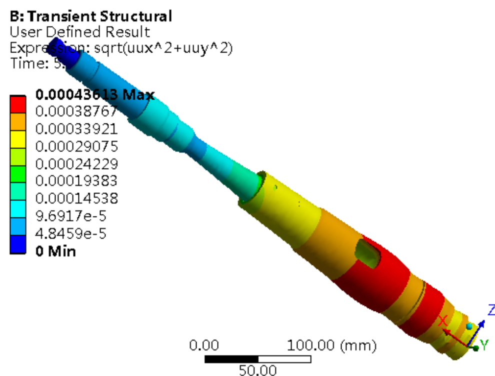
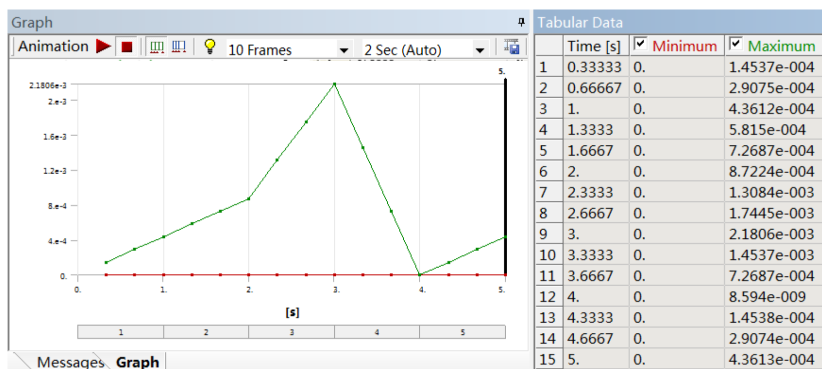


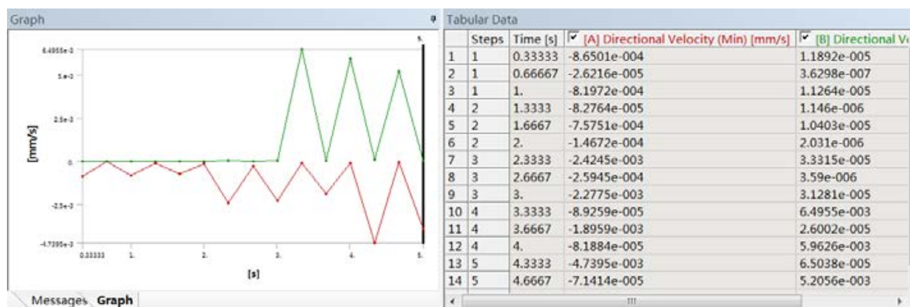
图 10-43　合成位移分析云图



	Time [s]	Minimum	Maximum
1	0.33333	0.	1.4537e-004
2	0.66667	0.	2.9075e-004
3	1.	0.	4.3612e-004
4	1.3333	0.	5.815e-004
5	1.6667	0.	7.2687e-004
6	2.	0.	8.7224e-004
7	2.3333	0.	1.3084e-003
8	2.6667	0.	1.7445e-003
9	3.	0.	2.1806e-003
10	3.3333	0.	1.4537e-003
11	3.6667	0.	7.2687e-004
12	4.	0.	8.594e-009
13	4.3333	0.	1.4538e-004
14	4.6667	0.	2.9074e-004
15	5.	0.	4.3613e-004

图 10-44 最大、最小合成位移图表

步骤 07 周向速度曲线：选择 Outline（分析树）中“Solution（B6）”下的“Chart”选项，此时在图形窗口中会出现如图 10-45 所示的周向速度曲线。



	Steps	Time [s]	[A] Directional Velocity (Min) [mm/s]	[B] Directional V
1	1	0.33333	-8.6501e-004	1.1892e-005
2	1	0.66667	-2.6216e-005	3.6298e-007
3	1	1.	-8.1972e-004	1.1264e-005
4	2	1.3333	-8.2764e-005	1.146e-006
5	2	1.6667	-7.5751e-004	1.0403e-005
6	2	2.	-1.4672e-004	2.031e-006
7	3	2.3333	-2.4245e-003	3.3315e-005
8	3	2.6667	-2.5945e-004	3.59e-006
9	3	3.	-2.2775e-003	3.1281e-005
10	4	3.3333	-8.9259e-005	6.4955e-003
11	4	3.6667	-1.8959e-003	2.6002e-005
12	4	4.	-8.1884e-005	5.9626e-003
13	5	4.3333	-4.7395e-003	6.5038e-005
14	5	4.6667	-7.1414e-005	5.2056e-003

图 10-45 周向速度曲线

10.2.10 保存与退出

步骤 01 单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。此时项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 10-46 所示。

步骤 02 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

步骤 03 单击主界面右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench，完成项目分析。

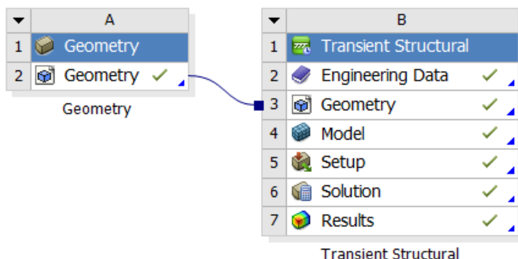


图 10-46 项目管理区中的分析项目

10.3 本章小结

本章主要介绍了瞬态分析相关内容，主要内容包括：模态叠加法求解瞬态分析的基本过程，并通过算例分析对分析过程进行了示例。瞬态分析着重于时间历程上结构的响应状况，有助于用户了解更多的系统响应特性，在工程中有广泛的应用。关于分析方法的有关理论，请参考帮助文档或瞬态分析相关资料。

第 11 章 模 态 分 析

模态分析在工程中应用广泛，因为结构的固有频率与相应的模态结构形状是设计承受变化载荷条件结构的重要参数，而模态分析用于计算结构的固有频率和模态形状。本章介绍使用 ANSYS Workbench 进行模态分析的方法。

学习目标：

- 理解进行模态分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行模态分析。

11.1 模态分析基础

本节将介绍模态分析的基础理论和在 ANSYS Workbench 中进行模态分析的流程。

11.1.1 概述

模态分析是分析结构自然频率和模态形状的方法，其在分析中会假设：①结构刚度矩阵和质量矩阵不发生改变；②除非指定使用阻尼特征求解方法，否则不考虑阻尼效应；③结构中没有随时间变化的载荷。

在无阻尼系统中，结构振动方程如下所示：

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}\}=\{0\}$$

式中 $[\boldsymbol{M}]$——质量矩阵；

$[\boldsymbol{K}]$——刚度矩阵；

$\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}$——节点加速度向量；

$\{\boldsymbol{u}\}$——节点位移向量。

其中刚度矩阵可以包括预应力效应带来的附加刚度。对于线性系统而言，自由振动满足下面方程：

$$\{\boldsymbol{u}\}=\{\boldsymbol{\varphi}_i\}\cos\omega_i t$$

式中 $\{\boldsymbol{\varphi}\}_i$——第 i 阶模态形状的特征向量；

ω_i——第 i 阶自然振动频率；

t——时间。

由前面两式可以得到：

$$(-\omega_i^2[\boldsymbol{M}]+[\boldsymbol{K}])\{\varphi_i\}=\{0\}$$

从式中得到结构的振动特征方程为：

$$|-\omega_i^2[\boldsymbol{M}]+[\boldsymbol{K}]|=0$$

通过该式可以求出第i阶自然振动频率ω_i，进而可以求出第i阶模态形状的特征向量$\{\boldsymbol{\varphi}\}_i$。将$\{\boldsymbol{\varphi}\}_i$对质量矩阵$[\boldsymbol{M}]$进行归一化处理，可以得到：

$$\{\boldsymbol{\varphi}_i\}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{\varphi}_i\}=1$$

如果$\{\boldsymbol{\varphi}\}_i$归一化处理，那么$\{\boldsymbol{\varphi}_i\}$中最大的向量坐标将归一化为 1.0。

11.1.2 模态分析过程

模态分析是线性分析的一种，对于任何非线性特性，如塑性和接触单元，在模态分析中将被忽略。模态分析的一般步骤包括：

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项，包括提取频率计算范围、提取模态数和模态计算方法等。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

进行预应力模态分析时，还需要在模态分析之前进行静力分析，并将静力分析的结果导入到模态分析的设置中。在设置模态分析选项时，一般需要设置最大模态阶数、频率变化范围等参数。

11.2 模态分析示例

本节通过进行模态分析操作，对模态分析的基本流程进行示例。

11.2.1 问题描述

某模型飞机的机翼如图 11–1 所示，其横截面在长度方向上是一致的，其中机翼的一端固定在飞机机体上，另一端为自由端，试对机翼进行模态分析，并求解其末态自由度。机翼的材料选用系统默认的钛合金。

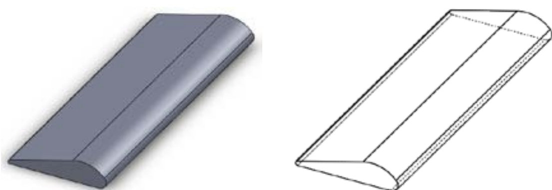


图 11–1　飞机机翼模型文件



11.2.2 建立分析项目

步骤 01 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

步骤 02 在 ANSYS Workbench 主界面中选择“Units”（单位）→“Metric（kg,mm,s,℃,mA,N,mV）”命令，设置模型单位，如图 11-2 所示。

步骤 03 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的“Component Systems”→“Geometry”（几何体）选项，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 11-3 所示。

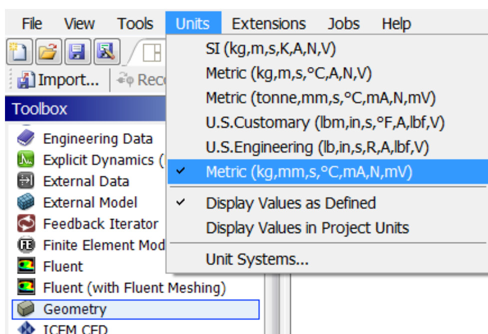


图 11-2 设置模型单位

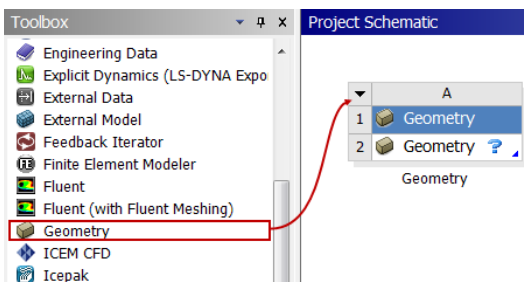


图 11-3 创建分析项目 A

步骤 04 在工具箱中的“Analysis Systems”→“Modal”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Geometry”红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B，此时相关联的数据可共享，如图 11-4 所示。

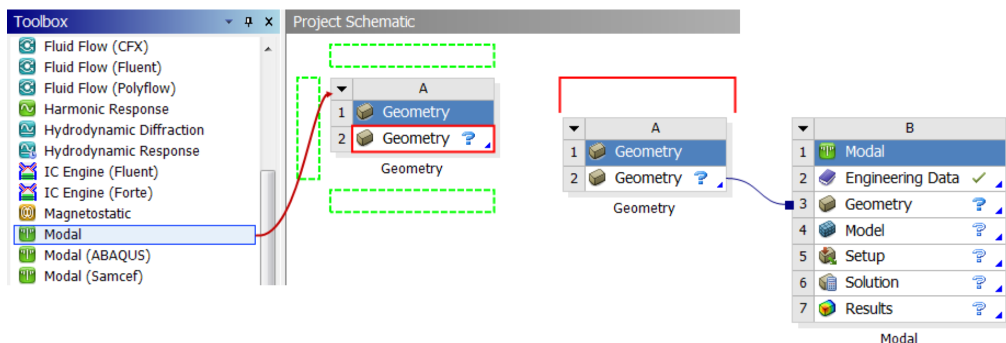


图 11-4 创建分析项目

11.2.3 导入几何体

步骤 01 在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”命令，如图 11-5 所示，此时会弹出“打开”对话框。

步骤 02 在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“char06-01”几何体文件，如图 11-6 所示，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

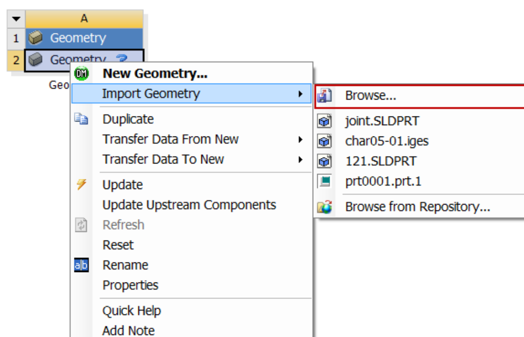


图 11-5 导入几何体

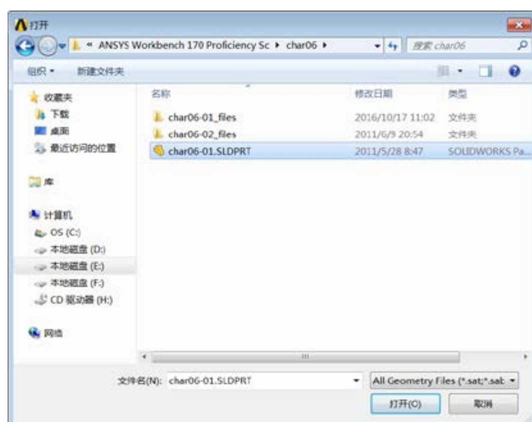


图 11-6 “打开”对话框

步骤 03 双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，此时会进入到 DM 界面，设计树中“Import1”前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 11-7 所示。

步骤 04 单击“Generate”（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 11-8 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

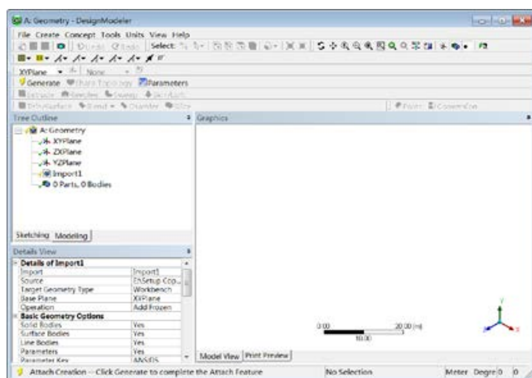


图 11-7 生成前的 DM 界面

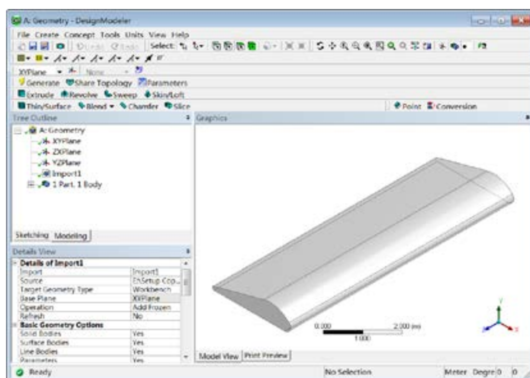


图 11-8 生成后的 DM 界面

步骤 05 单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮 ✕，退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

11.2.4 添加材料库

步骤 01 双击项目 B 中的 B2 栏中的“Engineering Data”项，进入如图 11-9 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数的设置。

步骤 02 在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 11-10 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2: Engineering Data 消失，取代以 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites。

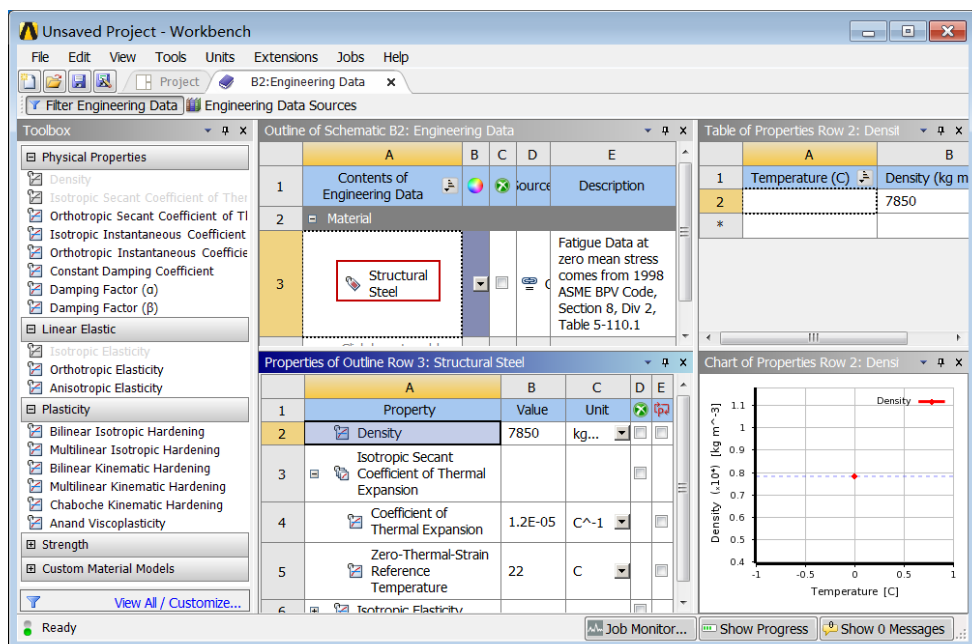


图 11-9　材料参数的设置界面（一）

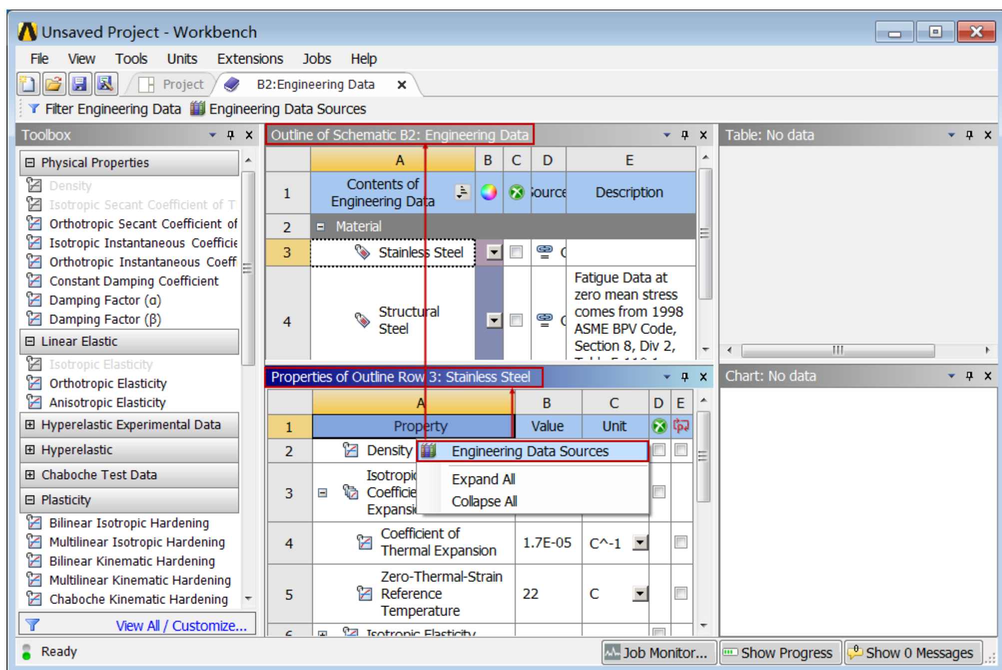


图 11-10　材料参数设置界面（二）

步骤 03　在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏“General Materials”，然后单击 Outline of General Materials 表中 B12 栏的“添加”按钮，此时在 C12 栏中会显示（使用中的）标识，如图 11-11 所示，表示材料添加成功。

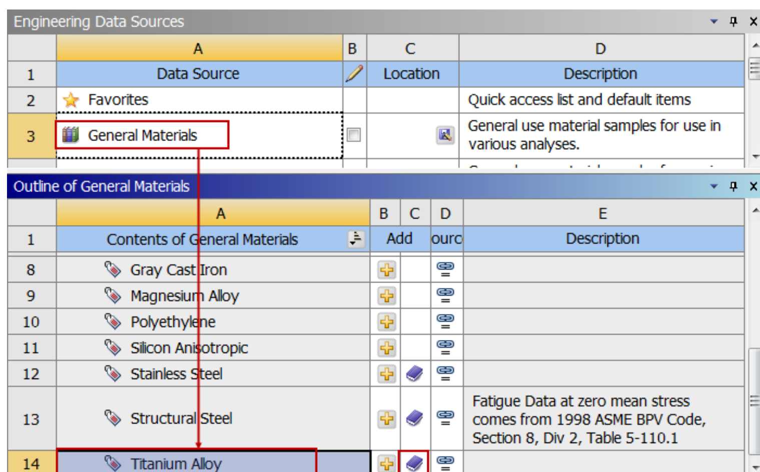


图 11-11　添加材料

步骤04 同步骤②，在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

步骤05 根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 4: Titanium Alloy 表中可以修改材料的特性，如图 11-12 所示，本实例采用的是默认值。

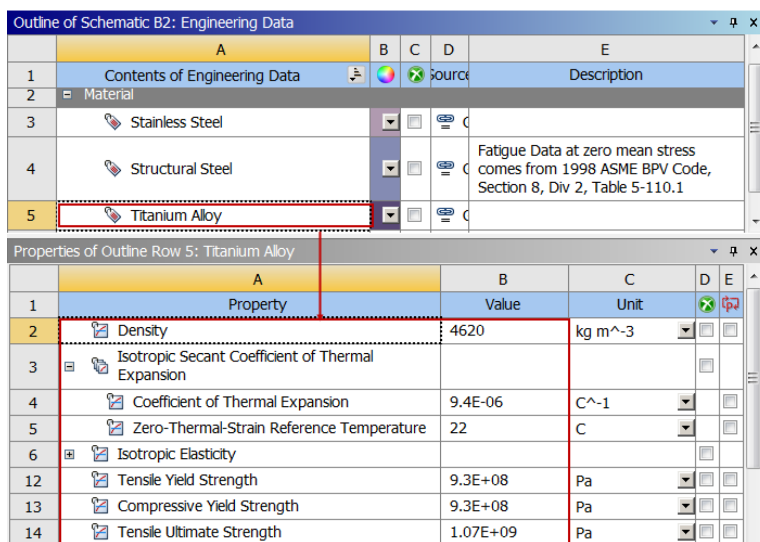


图 11-12　材料参数修改窗口

11.2.5 修改模型材料属性

步骤01 双击项目管理区中项目 B 的 B4 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，如图 11-13 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

步骤02 在 Mechanical 界面中选择“Units”（单位）→“Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）”命令，设置分析单位，如图 11-14 所示。

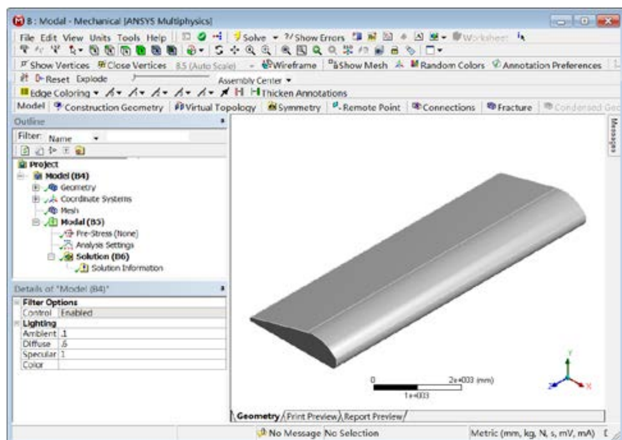


图 11-13　Mechanical 界面

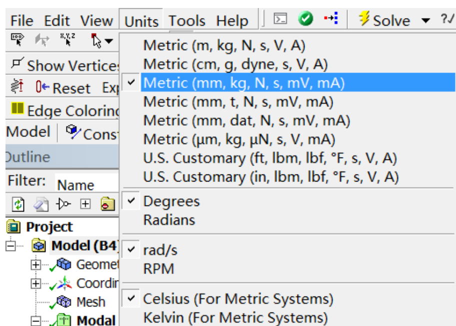


图 11-14　设置分析单位

步骤 03　选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中“Geometry”选项下的“char06-01”，此时即可在 Details of“char06-01”参数列表中修改模型的材料为“Titanium Alloy”，如图 11-15 所示。

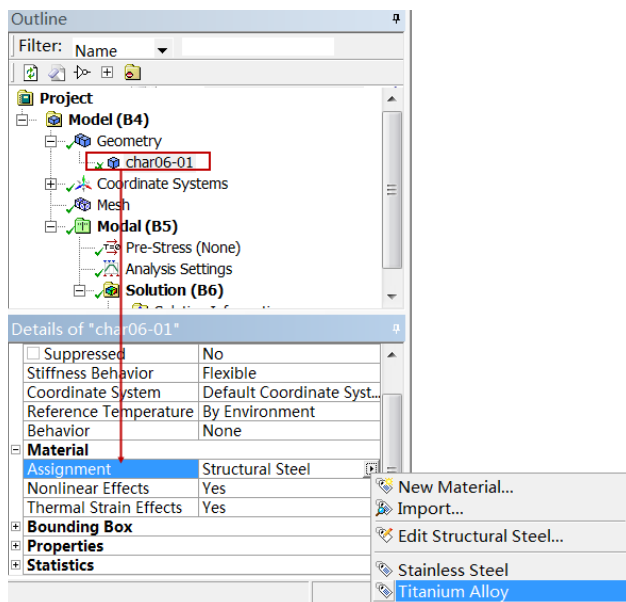


图 11-15　修改模型材料

11.2.6 划分网格

步骤 01　选中分析树中的“Mesh”项，单击 Mesh 工具栏中“Mesh Control”（网格控制）→“Sizing”（尺寸）命令，为网格划分添加尺寸控制，如图 11-16 所示，此时会在分析树中出现如图 11-17 所示的“Sizing”项。

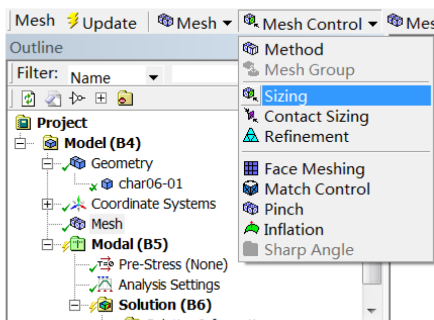


图 11-16 添加尺寸控制

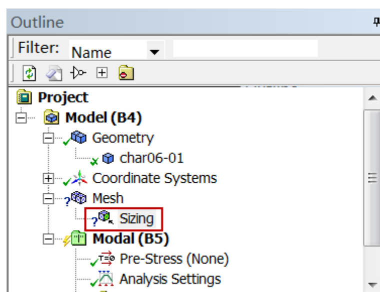


图 11-17 分析树

步骤02 单击图形工具栏中选择模式下的“Box Select”（框选）按钮，如图 11-18 所示，然后再单击“选择面”按钮。

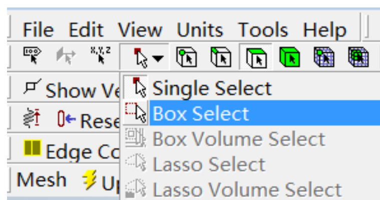


图 11-18 图形工具栏

步骤03 在图形窗口中选择如图 11-19 所示的面，在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成边的选择，设置“Element Size”为“100mm”，如图 11-20 所示。

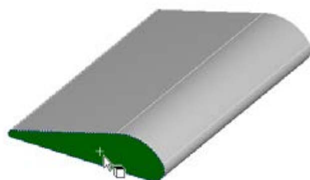


图 11-19 选择面

Details of "Face Sizing" - Sizing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	100. mm
Behavior	Soft

图 11-20 参数设置列表

步骤04 在 Outline（分析树）中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，此时会弹出如图 11-21 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 11-22 所示。

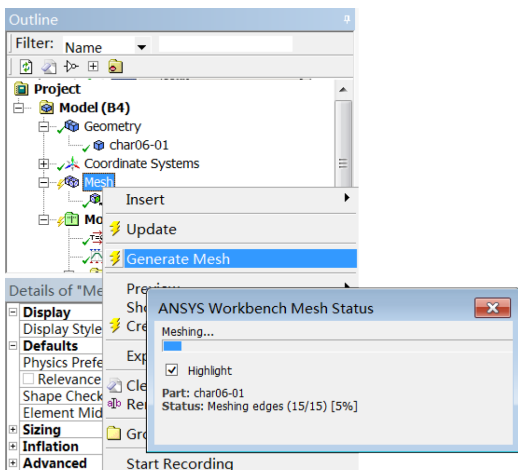


图 11-21 网格划分



图 11-22 网格效果



11.2.7 施加固定约束

步骤01 选中分析树中的“Modal（B5）”项，单击 Environment 工具栏中“Supports”（约束）→“Fixed Support”（固定约束）命令，为模型添加约束，如图 11-23 所示。

步骤02 单击图形工具栏中选择模式下的“Single Select”（点选）按钮，然后再单击“选择面”按钮。

步骤03 在图形窗口中选择如图 11-24 所示的面，在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成面的选择。

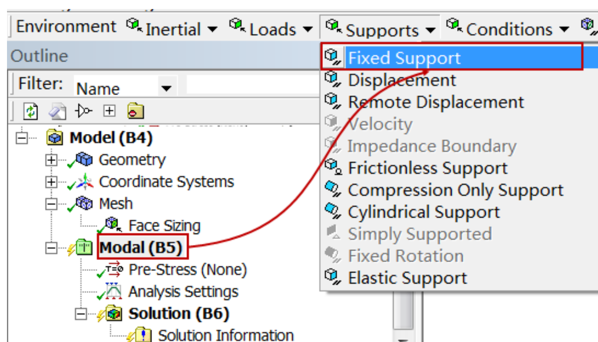


图 11-23 添加约束

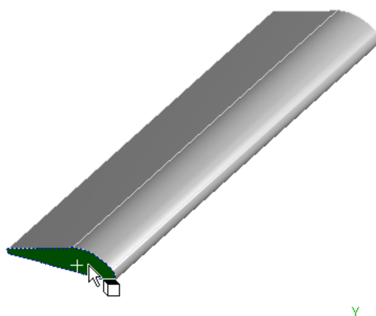


图 11-24 选择面

11.2.8 结果后处理

步骤01 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的“Analysis Settings”选项，在该选项下可以设置求解模态数、求解方法等选项，这里采用默认设置，求解模型的前六阶模态参数设置如图 11-25 所示。

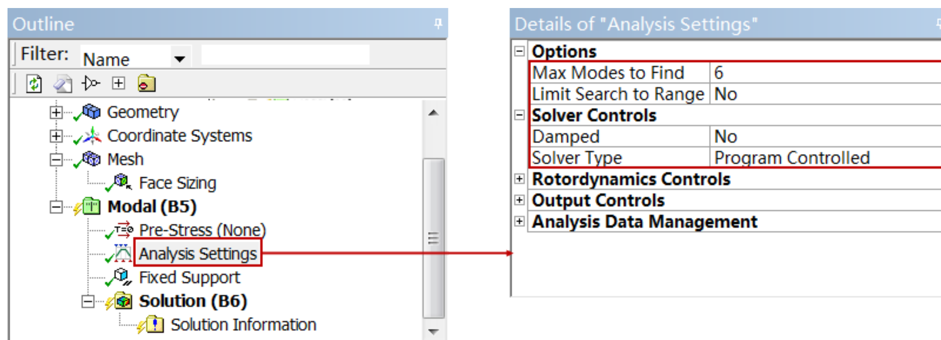


图 11-25 设置模态求解参数

步骤02 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项，此时会出现如图 11-26 所示的 Solution 工具栏。

步骤03 求解总变形：选择 Solution 工具栏中的“Deformation”（变形）→“Total”命令，如图 11-27 所示，此时在分析树中会出现“Total Deformation”（总变形）选项。

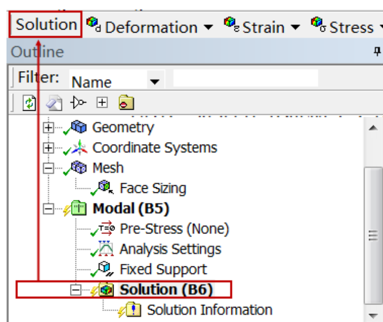


图 11-26 Solution 工具栏

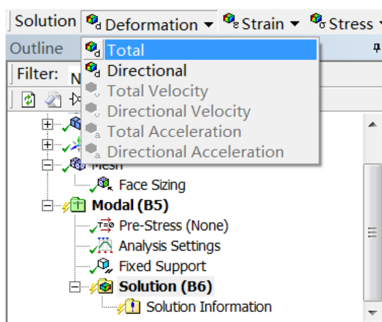


图 11-27 分析树

步骤04 按〈F2〉快捷键，更名为“Total Deformation-Mode 1”，并在参数设置列表中设置参数“Mode”为“1”，如图 11-28 所示。

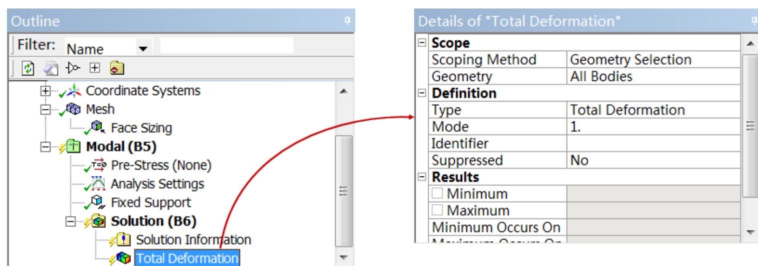


图 11-28 总变形参数设置列表

步骤05 利用同样的方法，添加其他的模态求解项，Total Deformation-Mode 2 对应二阶模态，Total Deformation-Mode 3 对应三阶模态，依次类推，最终设计树如图 11-29 所示。

11.2.9 求解并显示求解结果

步骤01 在 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”（求解）命令，如图 11-30 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

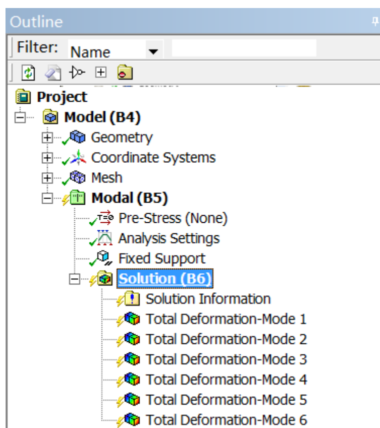


图 11-29 最终设计树

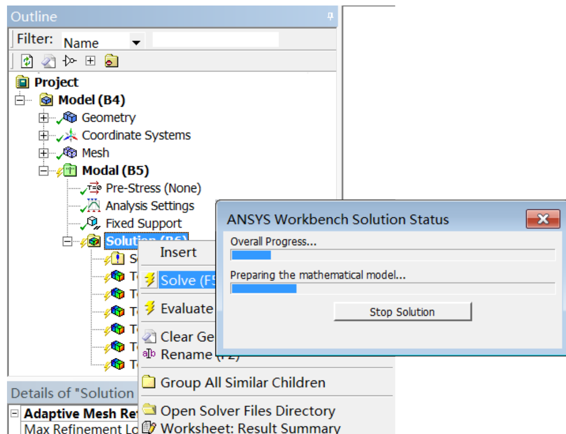


图 11-30 快捷菜单及求解进度条

步骤02 选择 Outline（分析树）→“Solution（B6）”→“Total Deformation-Mode 1”选项，此时在图形窗口中会出现如图 11-31 所示的一阶模态振型。

步骤03 利用同样的方法，可以观察其他各阶模态的分析结果，如图 11-32～图 11-36 所示。

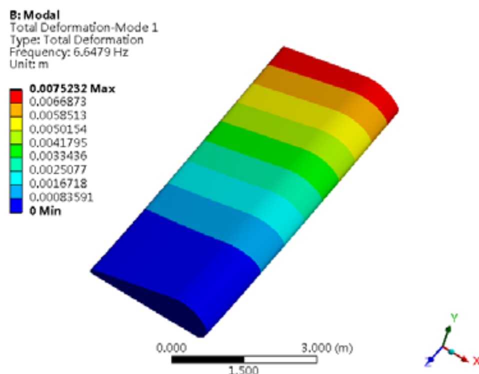


图 11-31　一阶模态振型

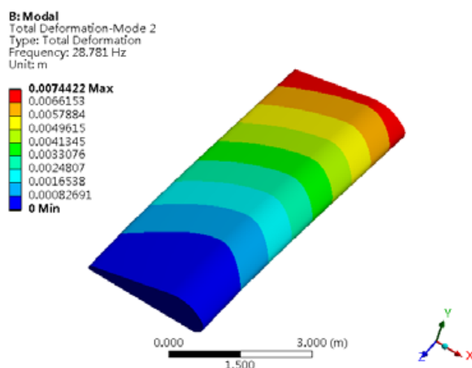


图 11-32　二阶模态振型

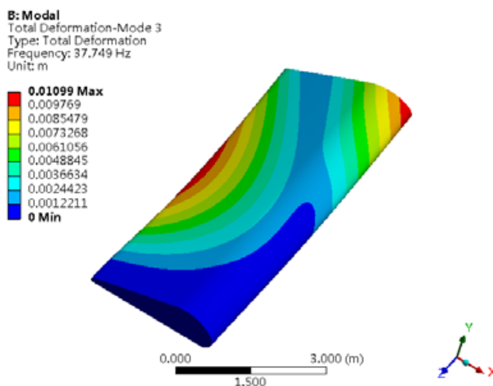


图 11-33　三阶模态振型

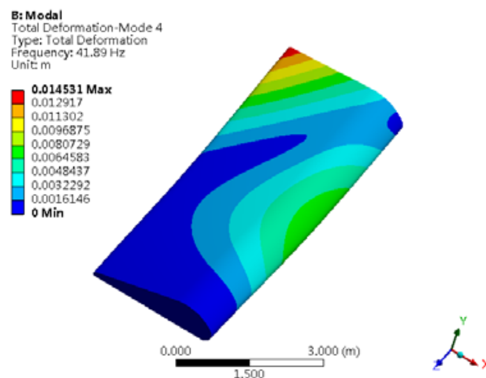


图 11-34　四阶模态振型

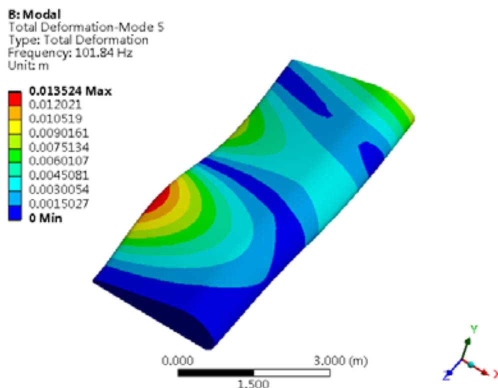


图 11-35　五阶模态振型

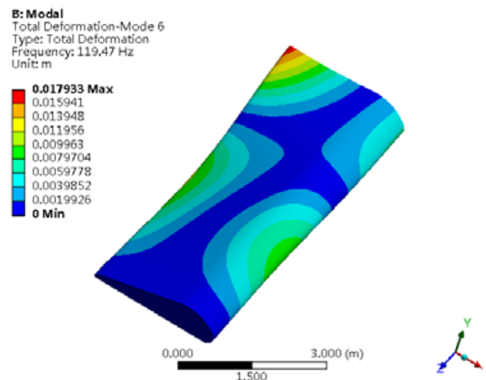
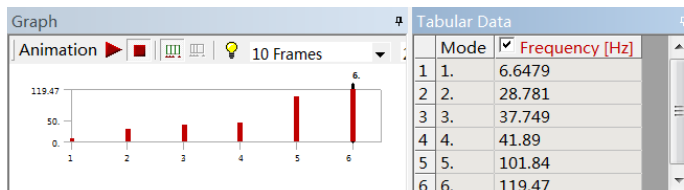


图 11-36　六阶模态振型

步骤 04 在 Mechanical 界面图形窗口下方，可以观察到模型的固有频率，如图 11-37 所示。



Mode	Frequency [Hz]
1 1.	6.6479
2 2.	28.781
3 3.	37.749
4 4.	41.89
5 5.	101.84
6 6.	119.47

图 11-37 模型固有频率

11.2.10 保存与退出

步骤 01 单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 11-38 所示。

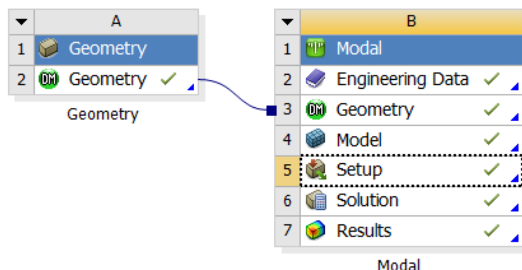


图 11-38 项目管理区中的分析项目

步骤 02 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

步骤 03 单击主界面右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench，完成项目分析。

11.3 本章小结

本章介绍了在 ANSYS Workbench 中实现模态分析的操作方法，主要内容为模态分析过程。模态分析在结构动力学分析中具有非常基础的地位，因而十分重要。在工程中，涉及频率相关问题时，也必须考虑进行模态分析。本章介绍仅为入门之用，如有更深的需求，请参考帮助文档和有关书籍。

第 12 章　谐响应分析

周期循环载荷最终会导致结构的周期循环响应，谐响应就是分析这种周期循环响应的方法。使用谐响应分析，可以帮助设计人员克服由于受迫振动带来的共振、疲劳和其他不良影响。本章将介绍在 ANSYS Workbench 中进行谐响应分析的有关内容。

学习目标：

- 理解进行谐响应分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行谐响应分析。

12.1　概述

谐响应分析是指通过计算结构在少量频率下的响应并得到一些响应值对频率的曲线，可以确定线性结构在承受随时间按正弦规律变化的载荷时的稳态响应，在得到的响应曲线上可找到峰值响应频率与响应幅值。

12.1.1　谐响应概念

谐响应分析技术只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑在开始激励时发生的瞬态振动，如图 12-1 所示。

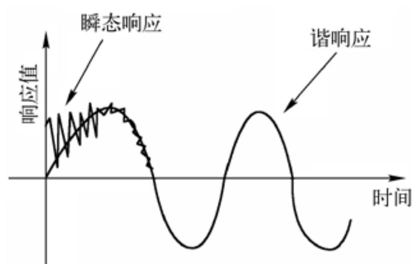


图 12-1　谐响应分析

谐响应分析是一种线性分析，会忽略任何已定义的非线性特性，如塑性和接触等，但其允许包含非对称矩阵，如分析流体-结构相互作用问题，也可用于分析有预应力的结构，如琴弦等。

12.1.2　谐响应分析理论简介

1. 谐响应分析假设与应用限制

谐响应分析可以用于结构、流场、磁场和电场分析中的自由度分析，以及在耦合场中与结构分析的自由度耦合的热分析自由度。但必须满足下列假设：

1）结构的刚度、阻尼和质量效应与频率无关。

2）所有载荷和位移约束在已知频率下正弦波动。

2. 谐响应相关理论

对于二阶系统，谐响应的过程可以使用下面方程来表示：

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}\}=\{\boldsymbol{F}^{a}\}$$

式中 $[\boldsymbol{M}]$——结构质量矩阵；

$[\boldsymbol{C}]$——结构阻尼矩阵；

$[\boldsymbol{K}]$——结构刚度矩阵；

$\{\boldsymbol{F}^{a}\}$——外加载荷向量；

$\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}$——节点加速度向量；

$\{\dot{\boldsymbol{u}}\}$——节点速度向量；

$\{\boldsymbol{u}\}$——节点位移向量。

上式的解具有如下形式：

$$\{u\}=\{u_{\max}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi}\}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t}$$

式中 $u_{\max}$——最大位移值；

i——常数-1 的平方根；

φ——位移值的相位角弧度值；

Ω——外加载荷圆频率；

t——时间。

注意到在不同的自由度方向上，$u_{\max}$ 和 φ 可能不同，使用复数来进行描述，方程可以写成：

$$\{\boldsymbol{u}\}=\{u_{\max}(\cos\varphi+\mathrm{i}\sin\varphi)\}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t}=(\{\boldsymbol{u}_1\}+\mathrm{i}\{\boldsymbol{u}_2\})\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t}$$

式中 $\{\boldsymbol{u}_1\}$——实位移向量；

$\{u_2\}$——虚位移向量。

说明：在施加节点位移约束的命令“D”中，两个值分别用 VALUE1、VALUE2 表示。

谐响应过程中，结构受力可以表达为：

$$\{F\}=\{F_{\max}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi}\}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t}=\{F_{\max}(\cos\varphi+\mathrm{i}\sin\varphi)\}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t}=(\{\boldsymbol{F}_1\}+\mathrm{i}\{\boldsymbol{F}_2\})\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t}$$

式中 $\{\boldsymbol{F}_1\}$——实作用力向量；

$\{\boldsymbol{F}_2\}$——虚作用力向量；

$\{\boldsymbol{F}\}$——结构受力。

在施加节点集中力的命令中，两个值分别用 VALUE1、VALUE2 表示。根据前面的方程，可以得到：

$$(-\Omega^2[\boldsymbol{M}]+\mathrm{i}\Omega[\boldsymbol{C}]+[\boldsymbol{K}])(\{\boldsymbol{u}_1\}+\mathrm{i}\{\boldsymbol{u}_2\})=(\{\boldsymbol{F}_1\}+\mathrm{i}\{\boldsymbol{F}_2\})$$

求解结果采用复数形式输出时，可以使用下式进行转换：

$$u_{\max}=\sqrt{u_1^2+u_1^2}$$

$$\varphi=\arctan\frac{u_1}{u_2}$$

网格单元内节点反力包括由于刚度、阻尼和质量效应分别带来的惯性力、阻尼力和变形

力，计算方式分别如下所示：

（1）惯性力计算

$$\{F_1^m\}_e = \Omega^2[M]_e\{u_1\}_e$$

$$\{F_2^m\}_e = \Omega^2[M]_e\{u_2\}_e$$

式中　$\{F_1^m\}_e$——单元内节点承受的惯性力实部向量；

$\{F_2^m\}_e$——单元内节点承受的惯性力虚部向量；

$[M]_e$——单元质量矩阵；

$\{u_1\}_e$——单元节点位移实部矩阵；

$\{u_2\}_e$——单元节点位移虚部矩阵。

（2）阻尼力计算

$$\{F_1^c\}_e = -\Omega[C]_e\{u_1\}_e$$

$$\{F_2^c\}_e = -\Omega[C]_e\{u_2\}_e$$

式中　$\{F_1^c\}_e$——单元内节点承受的阻尼力实部向量；

$\{F_2^c\}_e$——单元内节点承受的阻尼力虚部向量；

$[C]_e$——单元阻尼矩阵。

（3）变形力计算

$$\{F_1^k\}_e = -[K]_e\{u_1\}_e$$

$$\{F_2^k\}_e = -[K]_e\{u_2\}_e$$

式中　$\{F_1^k\}_e$——单元内节点承受的变形力实部向量；

$\{F_2^k\}_e$——单元内节点承受的变形力虚部向量；

$[K]_e$——单元刚度矩阵。

节点反力为惯性力、阻尼力和变形力这 3 种力的矢量和。

12.2　谐响应分析的方法与过程

本节介绍在 Workbench 中进行谐响应分析的基本过程。

12.2.1　谐响应分析方法

在 ANSYS Workbench 中可以采用两种方法进行谐响应分析，这两种方法分别为完全法和模态叠加法。

1. 完全（Full）法

该方法采用完整的系统矩阵计算谐响应，矩阵可以是对称或非对称矩阵，其优点如下。

1）不必关心如何选择主自由度和振型，使用容易。

2）使用完整矩阵，不对质量矩阵进行近似。

3）允许非对称矩阵（这种矩阵在声学或轴承问题中很典型）。

4）在一次计算中计算出所有的位移和应力。

5）允许施加各种类型的载荷，如节点集中力、非零约束以及单元分布载荷（压力和温度）。

6）允许将载荷施加在几何模型上。

该方法的缺点是直接消项方程求解法需要的时间通常比其他方法运行时间长。

2. 模态叠加（Mode Superposition）法

该方法通过对模态分析得到的振型（特征向量）乘上因子并求和计算出结构的响应，其优点如下。

1）对于许多问题，比缩减法或完全法更快。

2）可以使解在结构的固有频率附近聚集，并产生更平滑、更精确的响应曲线图。

3）可以包含预应力效果。

4）允许振型阻尼（阻尼系数为频率的函数）。

该方法的缺点是不能施加非零位移。在模态分析中使用 Power Dynamics 方法时，初始条件中不能有预加的载荷。

谐响应分析的这两种方法必须满足以下条件：

1）所有载荷必须随时间按正弦规律变化。

2）所有载荷必须有相同的频率。

3）不允许有非线性特性。

4）不计算瞬态效应。

12.2.2 谐响应分析过程

采用完全法进行谐响应分析时，分析的步骤如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项，包括求解频率范围、求解方法和阻尼系数等。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

使用模态叠加法进行谐响应分析时，还需要在谐响应分析前进行模态分析，并将模态分析的求解结果作为输入导入到谐响应分析中。

在谐响应分析中需注意设置求解频率范围和设置阻尼系数。

12.3 谐响应分析示例

本节将进行模态叠加法谐响应分析和完全法谐响应分析，并对两种分析的基本操作过程进行说明。

12.3.1 前处理

1．创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下），选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Modal”选项，在项目管理区创建分析项目 A。

3）在工具箱中的“Analysis System”→“Harmonic Response”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Solution”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B，此时相关联项的数据可共享。

4）在工具箱中的“Analysis System”→“Harmonic Response”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 B 的“Model”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 C，此时相关联项的数据可共享，如图 12-2 所示。

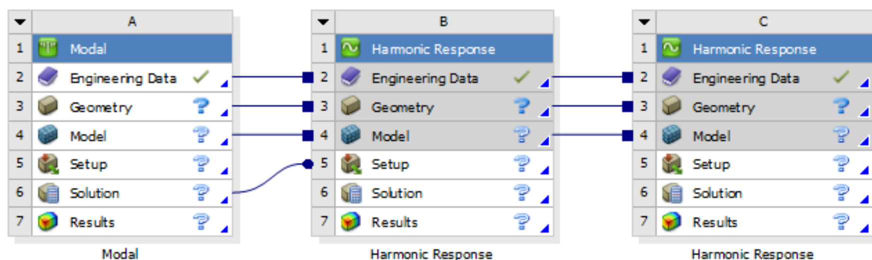


图 12-2 分析项目

2．定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row2:Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本实例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3．添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap11”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，进入到 DM 界面，如图 12-3 所示，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

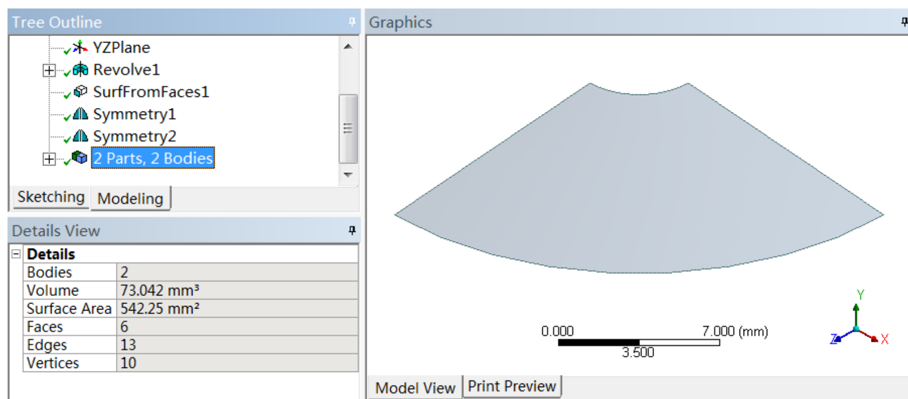


图 12-3　模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4．定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Surface Body”，此时即可在 Details of “Surface Body”细节窗口中给模型添加材料，如图 12-4 中所示。

3）单击参数列表“Material”下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel 无需更改。

4）在 Details of“Surface Body”细节窗口中设置“Thickness”为“0.1mm”，即设置面实体的厚度为 0.1mm，如图 12-4 所示。

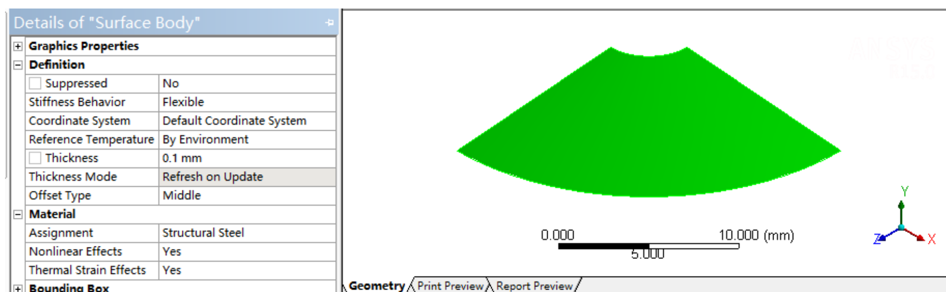


图 12-4　设置 Surface Body 细节

5．划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of

“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上单击，然后在工具栏中选择“Mesh Control”→“Sizing”，如图 12–5 所示，然后选择待划分的面体，在细节窗口“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“1mm”，如图 12–6 所示。

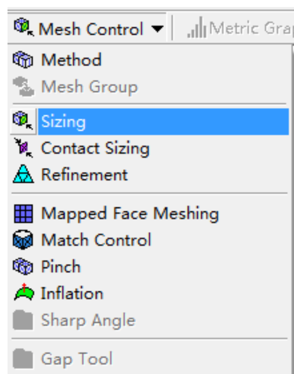
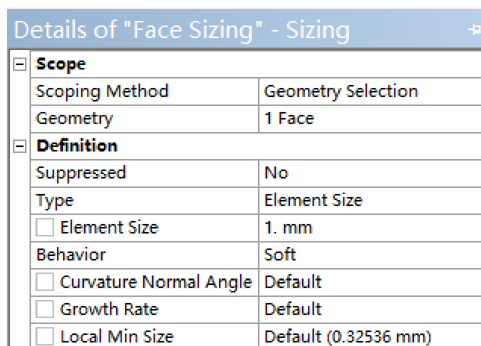


图 12–5　添加网格尺寸控制



Details of "Face Sizing" - Sizing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	1. mm
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	Default
Local Min Size	Default (0.32536 mm)

图 12–6　设置面划分尺寸

3）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，如图 12–7 所示，生成的网格如图 12–8 所示。

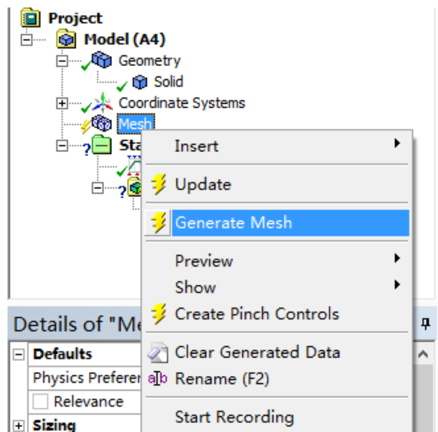


图 12–7　选择“划分网格”命令

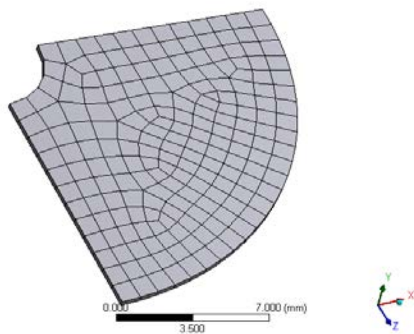


图 12–8　网格模型

12.3.2 模态分析

参考 10.2.2 节的操作流程。

12.3.3 模态叠加法分析

1．求解设置

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项，在细节窗口中设置“Range Minimum”为“0Hz”，“Range Maximum”为“10000Hz”，“Solution Method”

为“Mode Superposition”，如图 12-9 所示。

2．施加边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Harmonic Response（B5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

3）选中“Force”，选择需要施加压力的内圆边缘，单击 Details of “Force”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置如图 12-10 所示参数。

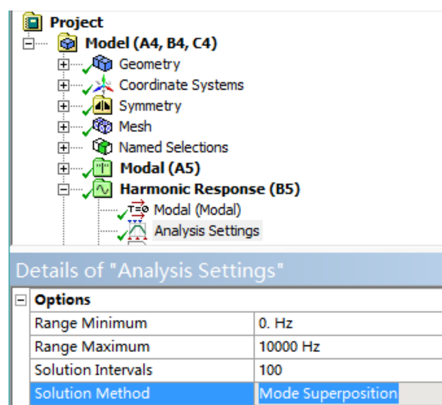


图 12-9　设置谐响应求解选项

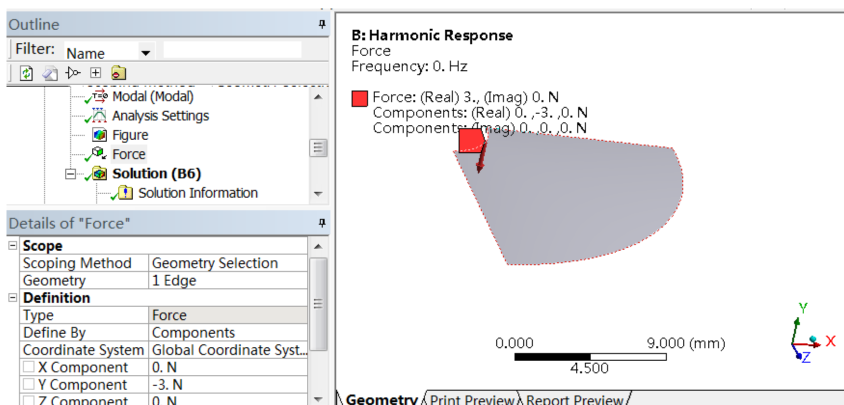
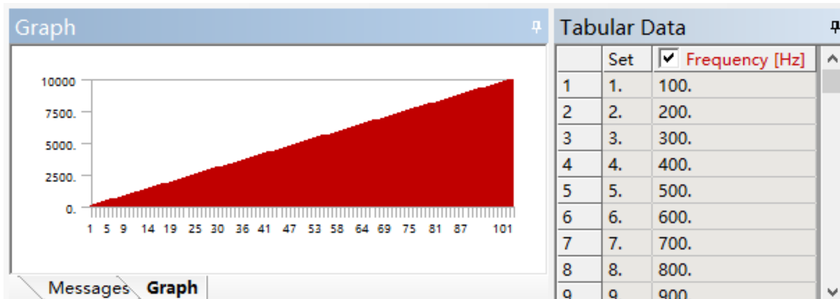


图 12-10　设置参数

4）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Harmonic Response（B5）”选项，查看载荷效果图。

3．求解

在 Outline 树结构图中的“Harmonic Response（B5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息，求解完成后显示求解过程中使用的数据图表，如图 12-11 所示。



	Set	Frequency [Hz]
1	1.	100.
2	2.	200.
3	3.	300.
4	4.	400.
5	5.	500.
6	6.	600.
7	7.	700.
8	8.	800.
9	9.	900.

图 12-11　求解过程中使用的频率加载数据

4．查看求解结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Total Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图，并对其选项进行设置，设置的参数见表 12-1。

表 12-1　查看求解结果设置

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection
Geometry	All Bodies	All Bodies
Shell		Top/Bottom
Layer		Entire Section
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Frequency	Frequency
Frequency	Last	Last
Phase Angle	0°	0°

4）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体变形云图如图 12-12 所示。

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，设置参数见表 12-1，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力云图如图 12-13 所示。

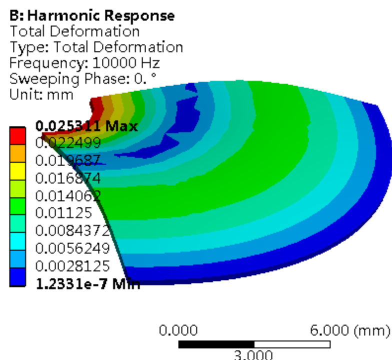


图 12-12　整体变形云图

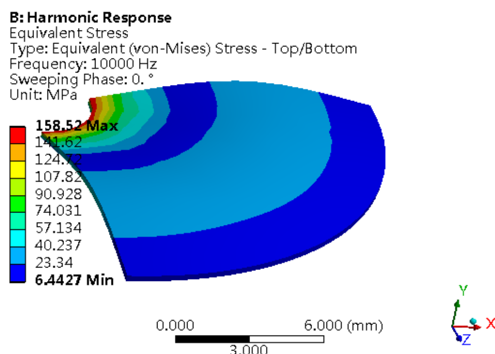


图 12-13　等效应力云图

8）选择 Solution 工具栏中的“Frequency Response”→“Deformation”，此时在树结构图中会出现“Frequency Response”选项。

9）Frequency Response 的细节窗口设置见表 12−2，并选择内边缘，在“Geometry”项后单击“Apply”按钮。

表 12−2　频率响应结果设置

	Frequency Response	Phase Response	Frequency Response 2
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection
Geometry	1 Edge	1 Edge	1 Edge
Definition			
Type	Directional Deformation	Directional Deformation	Directional Deformation
Orientation	*Y* Axis	*Y* Axis	*X* Axis
Suppressed	No	No	No
Options			
Frequency Range	Use Parent		Use Parent
Minimum Frequency	0Hz		0Hz
Maximum Frequency	10000Hz		10000Hz
Display	Bode		Bode
Frequency		3400Hz	
Duration		720°	

10）在 Outline 树结构图中的“Frequency Response”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 *Y* 向变形频率响应图如图 12−14 所示。

11）选择 Solution 工具栏中的“Frequency Response”→“Deformation”，此时在树结构图中会出现“Frequency Response 2”选项。

12）Frequency Response 2 的细节窗口设置见表 12−2，并选择内边缘，在“Geometry”项后单击“Apply”按钮。

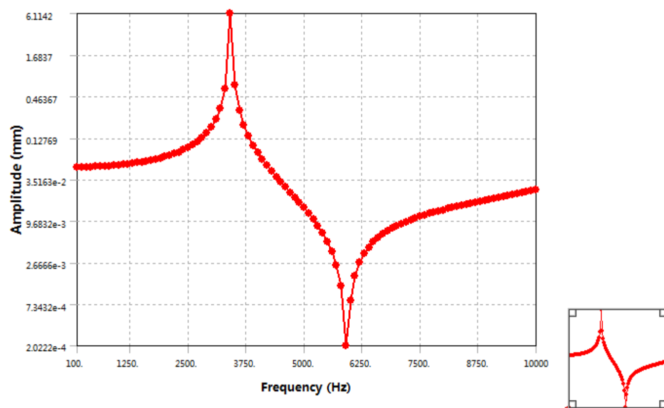


图 12−14　*Y* 向变形频率响应图

13）在 Outline 树结构图中的“Frequency Response 2”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 *X* 向变形频率响应图如图 12-15 所示。

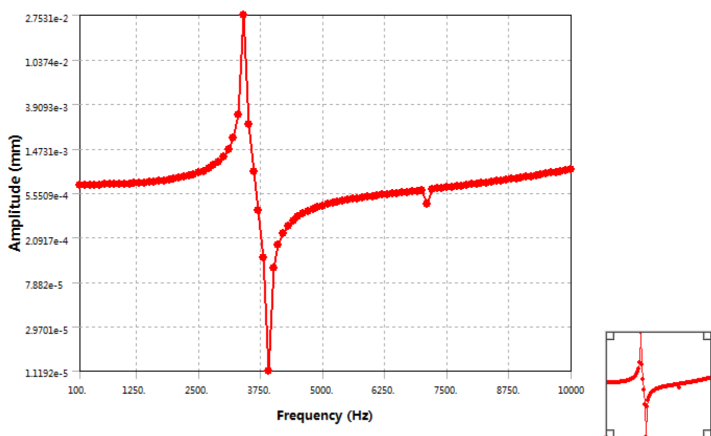


图 12-15　*X* 向变形频率响应图

14）选择 Solution 工具栏中的“Phase Response”→“Deformation”，此时在树结构图中会出现“Phase Response”选项。

15）Phase Response 的细节窗口设置见表 12-2，并选择内边缘，在“Geometry”项后单击“Apply”按钮。

16）在 Outline 树结构图中的“Phase Response”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的相位响应图如图 12-16 所示。

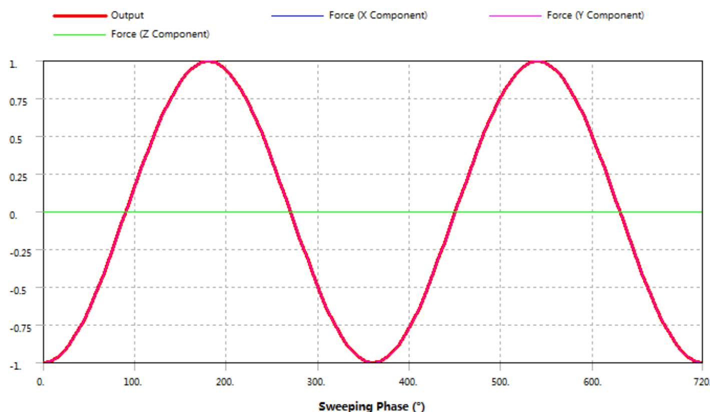


图 12-16　相位响应图

12.3.4 完全法分析

1．求解设置

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项，在细节窗口中设置

“Range Mininum”为“0Hz”，“Range Maximum”为“10000Hz”，“Solution Method”为“Full”，如图 12-17 所示。

2．施加边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Harmonic Response（C5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

3）选中“Force”，选择需要施加压力的内圆边缘，单击 Details of“Force”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，设置参数见表 12-3。

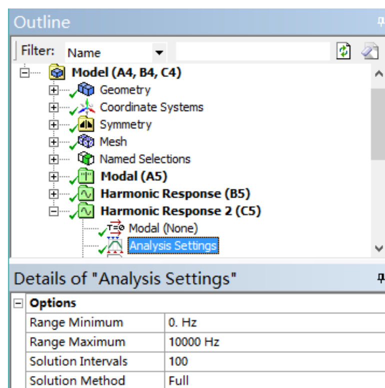


图 12-17　完全法分析选项设置

表 12-3　边界条件设置

	Displacement	Displacement 2	Displacement 3	Force
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection
Geometry	1Edge	1Edge	1Edge	1Edge
Definition				
Type	Displacement	Displacement	Displacement	Force
Define By	Components	Components	Components	Components
Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0mm	Free	Free	0N
Y Component	Free	0mm	Free	-3N
Z Component	Free	Free	0mm	0N
Phase Angle	0°	0°	0°	0°
Suppressed	No	No	No	No

4）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Displacement”选项。

5）选中“Displacement”，选择 *X* 方向坐标为 0 的边缘，单击 Details of“Displacement”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束。此时设置 *X* 向的位移为“0mm”，见表 12-3。

6）按照上面的方法，继续设置 *Y* 方向坐标为 0 的边缘 *Y* 向位移为“0mm”，见表 12-3。

7）按照上面的方法，继续设置 *Z* 方向坐标为 0 的边缘 *Z* 向位移为“0mm”，见表 12-3。

8）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Harmonic Response 2（C5）”选项，查看边界条件效果图，如图 12-18 所示。



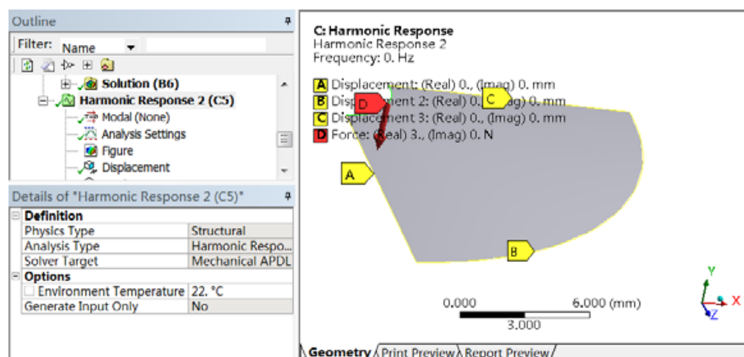


图 12-18　边界条件效果图

3．求解

在 Outline 树结构图中的“Harmonic Response（C5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

4．查看求解结果

单击目录树中的 Frequency Response、Frequency Response2、Phase Response，得到的频率响应结果如图 12-19～图 12-21 所示。

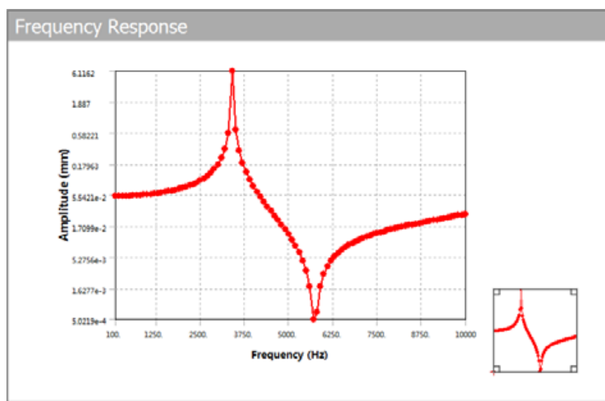


图 12-19　*Y* 向位移频率响应图

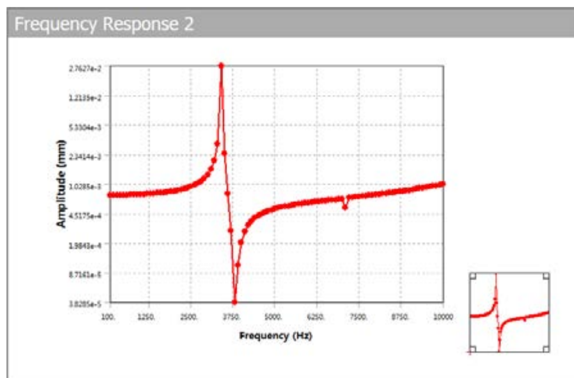


图 12-20　*X* 向位移频率响应图

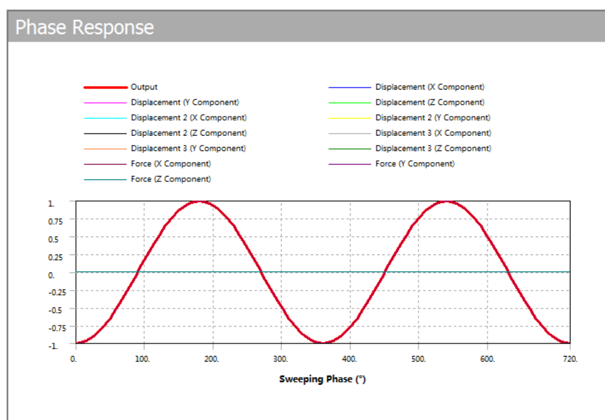


图 12-21　相位响应图

5．保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 12-22 所示。

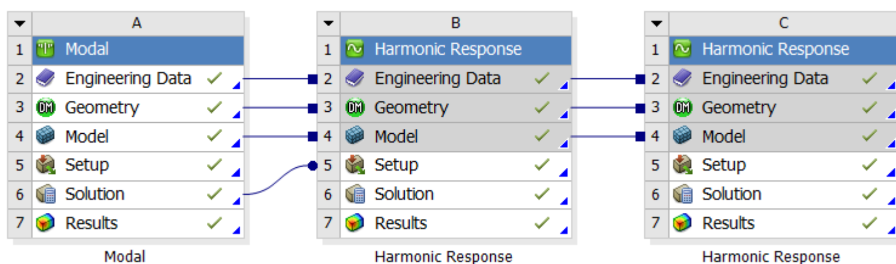


图 12-22　完成分析的项目工程图

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

12.4　本章小结

本章主要介绍了谐响应分析相关内容，主要内容包括：完全法和模态叠加法求解谐响应分析的基本过程，并通过算例分析对分析过程进行了示例。谐响应分析着重于频率范围内的激励下结构的响应状况，有助于帮助用户了解系统频率响应特性，在工程中有广泛的应用。关于分析方法的有关理论，请参考帮助文档或谐响应分析相关资料。

第 13 章　响应谱分析

谱分析是模态分析的延伸，可以将模态分析的结果与一种已知的谱联系起来，进而计算模型的响应情况。在工程中，响应谱分析可以替代时间历程分析来计算结果谱载荷或时间变化载荷的响应情况。本章将介绍响应谱分析在 ANSYS Workbench 17.0 中的操作流程。

学习目标：

- 理解进行响应谱分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行响应谱分析。

13.1　响应谱分析基础

13.1.1　响应谱分析概述

响应谱分析使用图形表现随频率变化的谱值，反映时间历程载荷特征，其输入代表结构在单个自由度上对时间历程函数载荷的最大响应情况，包括单点响应谱和多点响应谱分析，如图 13-1 所示。

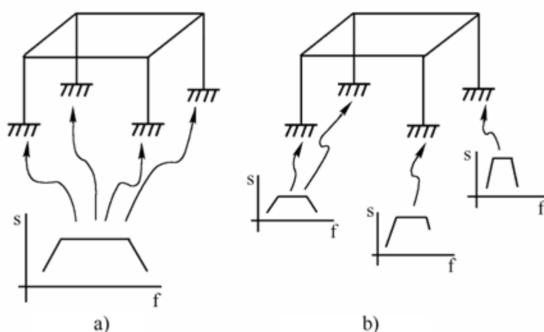


图 13-1　单点响应谱和多点响应谱

a) 单点响应谱　b) 多点响应谱

响应谱分析包含以下假设和限制。

1）结构必须是线性的。

2）对于单点响应谱分析而言，结构承受的载荷激励的频率和方向都是已知的，并且在所有支撑点上共同作用或在节点的主自由度方向上作用。

3）对于多点响应谱分析，结构的激励来自不同的输入谱在不同的支持点或非支持点的

节点上。

进行谱分析之前必须进行模态分析。谱分析有关理论较为复杂，本章不再说明，如有兴趣了解或使用需要，请参考帮助文档和有关理论书籍。

13.1.2 响应谱分析过程

响应谱分析的一般步骤如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项，包括设置激励载荷。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

在进行响应谱分析时，必须区分其类型是单点谱分析还是多点谱分析，可以在求解选项中进行设置。根据分析的类型不同，能够添加的边界条件也有差别。

另外需要注意的是，在进行响应谱分析前必须进行模态分析，且提取的模态数量应足以表征感兴趣频率范围内结构所具有的响应。

13.2 响应谱分析示例

本节对单点响应谱分析和多点响应谱分析进行示例。

13.2.1 前处理

1．创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）中，选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Modal”选项，在项目管理区创建分析项目 A。

3）在工具箱中的“Analysis System”→“Response Spectrum”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Solution”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B，此时相关联项的数据可共享。

4）在工具箱中的“Analysis System”→“Response Spectrum”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Solution”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 C，此时相关

联项的数据可共享，如图 13-2 所示。

2．定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row2:Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本实例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3．添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

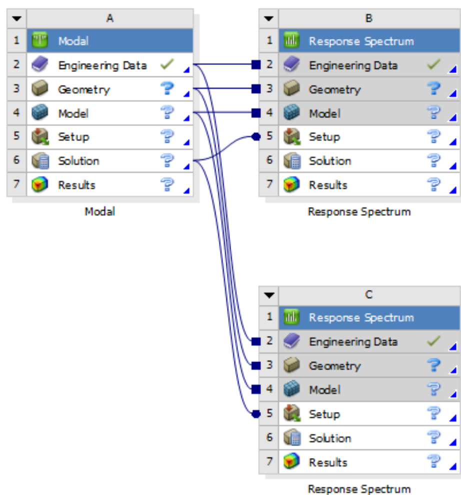


图 13-2　分析项目

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap12”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 变为 ，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，进入到 DM 界面，查看模型如图 13-3 所示。此时如果设计树中“Import1”前显示 ，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

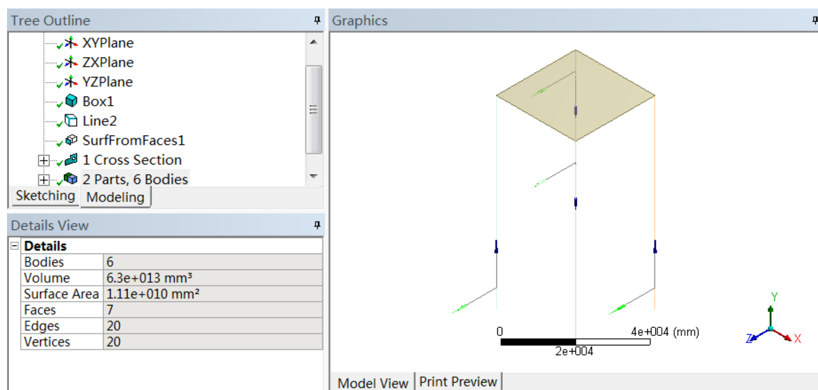


图 13-3　DM 模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4．定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，如图 13-4 所示，其包含了需要进行的 3 个分析，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

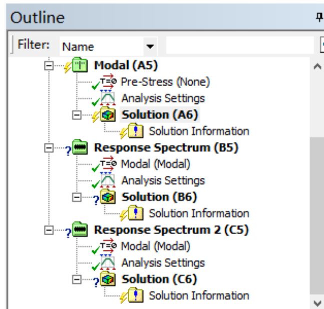


图 13-4　分析树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Surface Body”或“Line Body”，此时即可在细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中去。此时树结构图 Geometry 前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5．划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of “Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上单击，然后在工具栏中选择“Mesh Control”→“Sizing”，如图 13-5 所示，设置“Element Size”（单元尺寸）为 750mm，如图 13-6 所示。

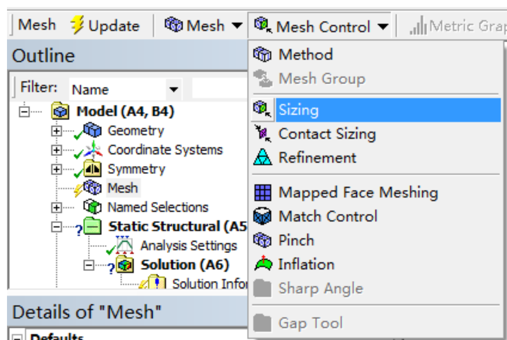


图 13-5　添加网格尺寸控制

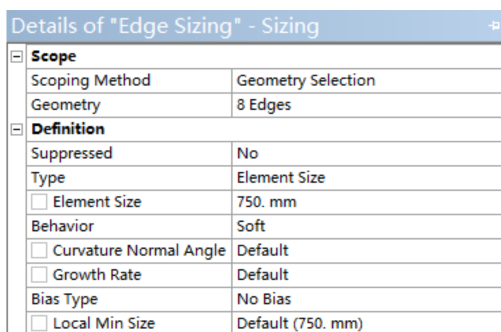


图 13-6　设置面划分尺寸

3）选择待划分体的所有边缘，如图 13-7 所示，在细节窗口中的“Geometry”选项下单击“Apply”按钮。

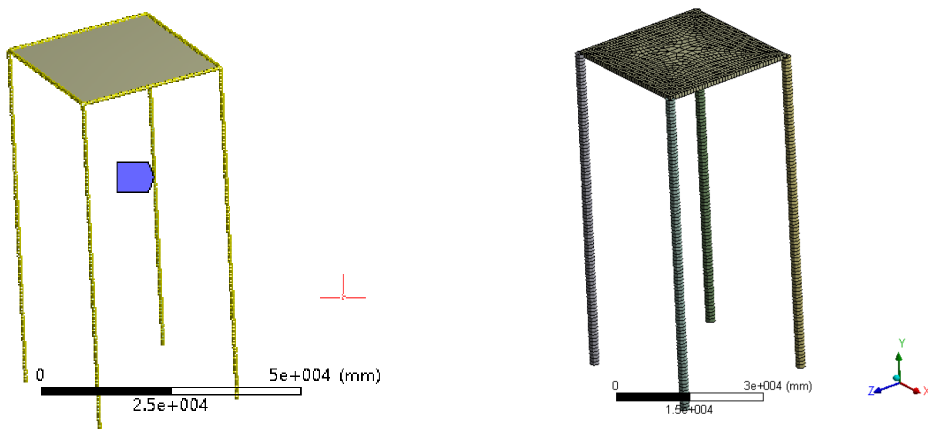


图 13-7　网格划分图

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 13-8 所示。

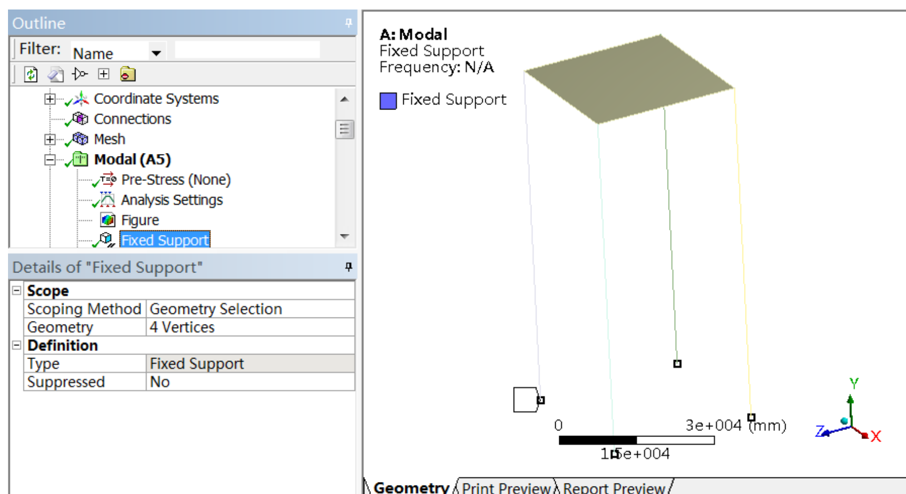


图 13-8　固定约束

6．定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Modal（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”命令，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选中“Fixed Support”，选择需要施加固定约束的 4 个脚上的顶点，单击 Details of “Fixed Support”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中顶点上施加固定约束。

4）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Displacement”选项。

5）选中“Displacement”，选择所有 4 条支撑边缘，单击 Details of “Displacement”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束。此时设置 *X* 向的位移为 0，如图 13-9 所示。

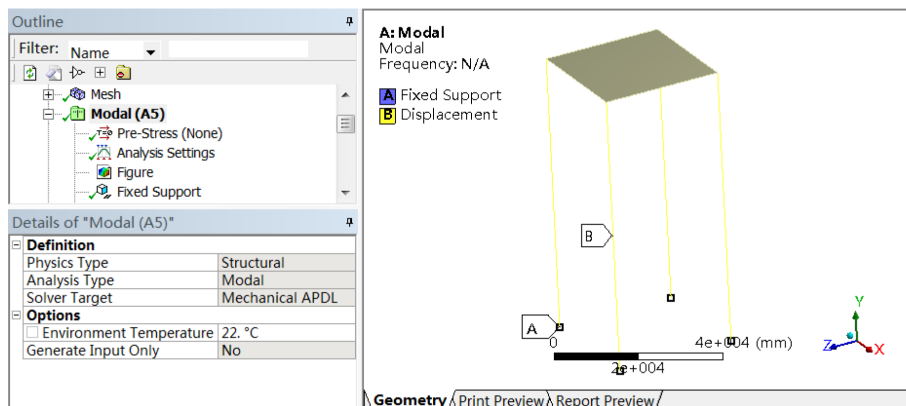


图 13-9　*X* 向位移约束

6）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Modal（A5）”选项，查看施加边界条件后的示意图，如图 13-10 所示。

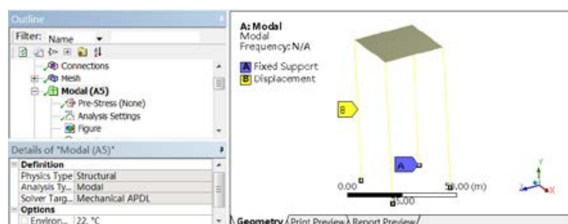


图 13-10 边界条件示意图

13.2.2 模态分析

1．分析选项设置

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项，设置细节窗口参数，如图 13-11 所示。

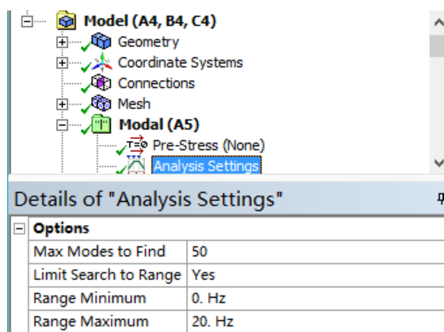


图 13-11 设置模态分析选项

2．求解

在 Outline 树结构图中的“Modal（A5）”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息，得到的频率数据如图 13-12 所示。

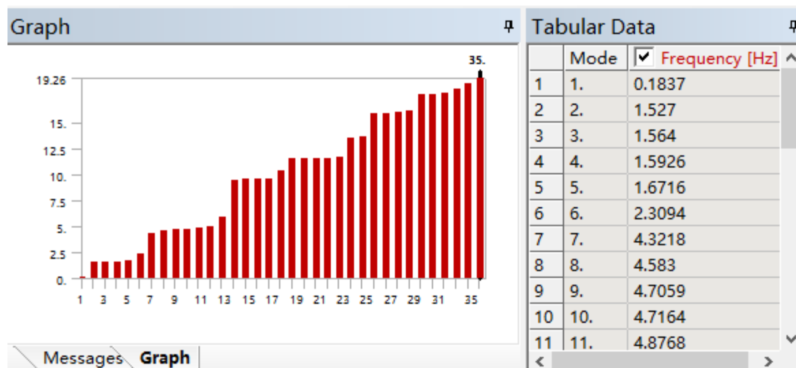


图 13-12 求解得到的频率数据



3．查看求解结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图，并对其选项进行设置，见表 13-1。

4）按照上面的方法，继续添加 Total Deformation 2～6，参数设置见表 13-1。

表 13-1　求解结果设置

	Total Deformation	Total Deformation2	Total Deformation3	Total Deformation4	Total Deformation5	Total Deformation6
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection2	Geometry Selection3	Geometry Selection4	Geometry Selection5	Geometry Selection6
Geometry	All Bodies	All Bodies	All Bodies	All Bodies	All Bodies	All Bodies
Definition						
Type	Total Deformation	Total Deformation2	Total Deformation3	Total Deformation4	Total Deformation5	Total Deformation6
Mode	1	2	3	4	5	6

5）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Result”，此时进行求解，求解后得到的模态变形图如图 13-13 所示。

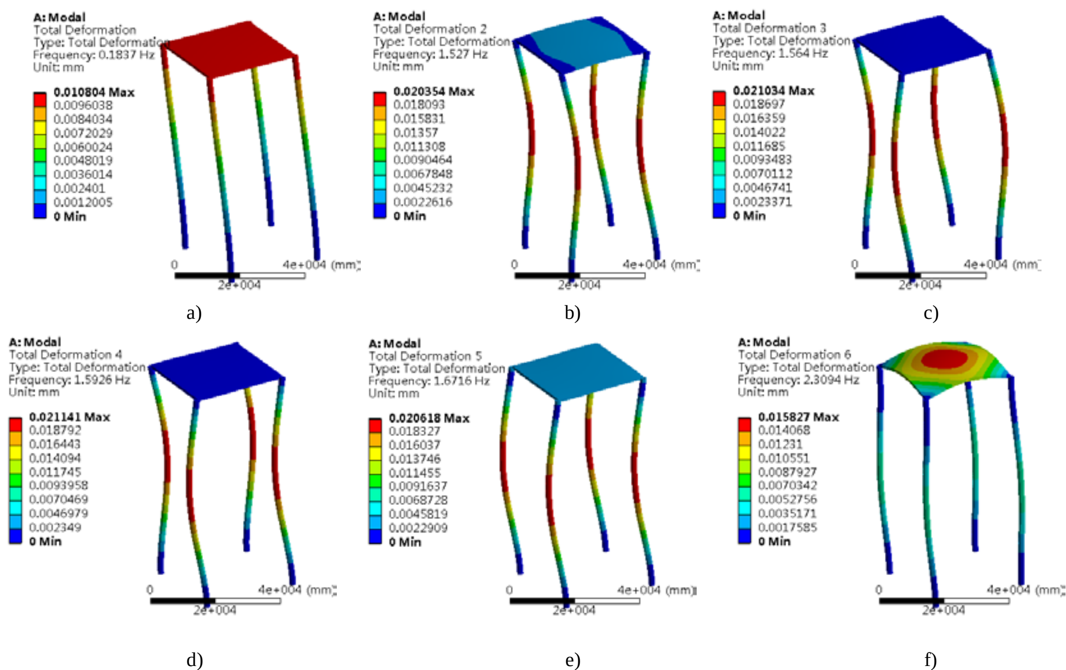


图 13-13　模态变形图

a) 第 1 阶模态　b) 第 2 阶模态　c) 第 3 阶模态
d) 第 4 阶模态　e) 第 5 阶模态　f) 第 6 阶模态

13.2.3 单点响应谱分析

1. 分析选项设置

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项（分析项目 B 内），在细节窗口中设置参数，“Number Of Models To Use”为“All”，“Spectrum Type”为“Single Point”，“Modes Combination Type”为“SRSS”，如图 13-14 所示。

2. 边界激励条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Response Spectrum（B5）”，在工具栏中选择“RS Base Excitation”→“RS Displacement”，如图 13-15 所示，此时在树结构图中出现“RS Displacement”对象。

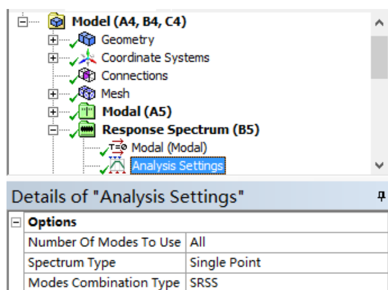


图 13-14 单点谱分析设置

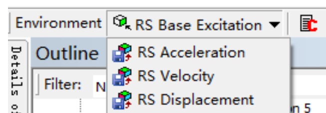


图 13-15 边界激励条件设置

2）设置 RS Displacement 的细节窗口如图 13-16 所示，其中“Direction”为“Z Axis”，设置谱数据见表 13-2，得到的谱曲线如图 13-17 所示。

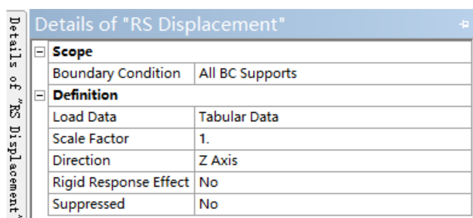


图 13-16 谱细节窗口

表 13-2 谱数据

行 数	Frequency/Hz	Displacement/mm	行 数	Frequency/Hz	Displacement/mm
1	1.20E-02	1	9	5.28E-02	5
2	1.45E-02	1.5	10	6.35E-02	5.5
3	1.74E-02	2	11	7.64E-02	5.25
4	2.09E-02	2.5	12	9.19E-02	5
5	2.52E-02	3	13	0.11052	4.75
6	3.03E-02	3.5	14	0.13296	4.5
7	3.65E-02	4	15	0.15995	4.25
8	4.39E-02	4.5	16	0.19242	4

（续）

行　数	Frequency/Hz	Displacement/mm	行　数	Frequency/Hz	Displacement/mm
17	0.23148	3.75	29	2.1267	0.9
18	0.27847	3.5	30	2.5584	0.8
19	0.335	3.25	31	3.0778	0.7
20	0.40301	3	32	3.7025	0.6
21	0.48482	2.75	33	4.4542	0.5
22	0.58324	2.5	34	5.3584	0.4
23	0.70163	2.25	35	6.4461	0.3
24	0.84406	2	36	7.7547	0.2
25	1.0154	1.75	37	9.3289	0.1
26	1.2215	1.5	38	11.223	7.00E-02
27	1.4695	1.25	39	13.501	4.00E-02
28	1.7678	1	40	16.241	1.00E-02

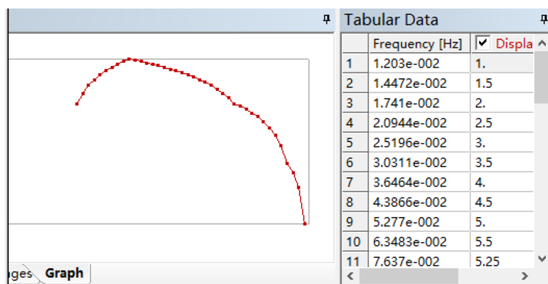


图 13-17　谱曲线

3. 求解

在 Outline 树结构图中的“Response Spectrum”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

4. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力云图如图 13-18 所示。

5）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构

图中会出现“Directional Deformation”对象。

6）设置 Directional Deformation 对象的细节窗口下的“Orientation”为“Y Axis”，如图 13-19 所示。

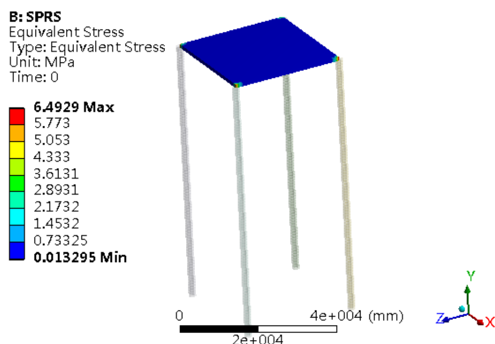
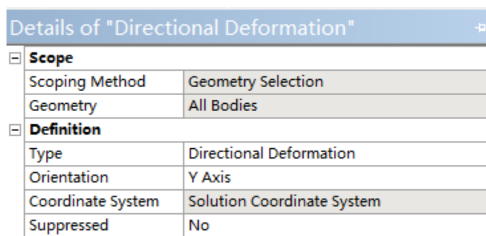


图 13-18　等效应力云图


Details of "Directional Deformation"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Directional Deformation
Orientation	Y Axis
Coordinate System	Solution Coordinate System
Suppressed	No

图 13-19　设置方向性变形

7）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

8）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构图中会出现“Directional Deformation 2”对象。

9）设置 Directional Deformation 2 对象的细节窗口中的“Orientation”为“Z Axis”。

10）在 Outline 树结构图中的“Directional Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 *Y* 向变形云图和 *Z* 向变形云图分别如图 13-20 和图 13-21 所示。

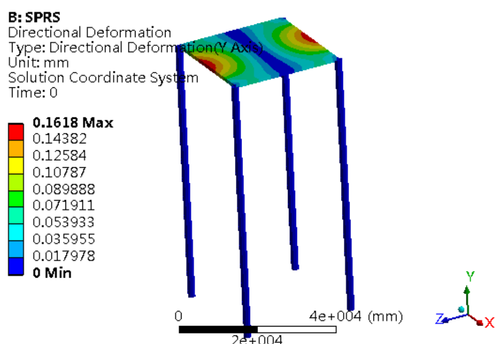


图 13-20　*Y* 向变形云图

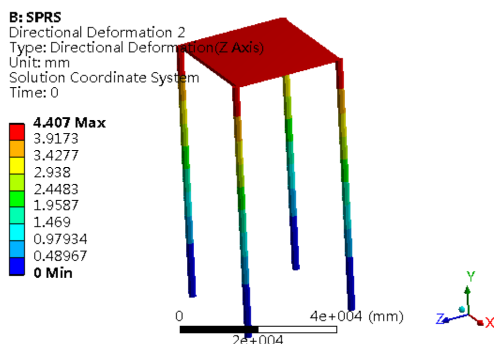


图 13-21　*Z* 向变形云图

13.2.4 多点响应谱分析

1. 分析选项设置

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项（分析项目 B 内），在细节窗口中设置参数，“Number Of Models To Use”为“All”，“Spectrum Type”为

“Multiple Points”，“Modes Combination Type”为“SRSS”，如图 13-22 所示。

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Response Spectrum2（C5）”，在工具栏中选择“RS Base Excitation”→“RS Displacement”，此时在树结构图中出现“RS Displacement”对象。

3）在 RS Displacement 的细节窗口中设置“Direction”为“Z Axis”，设置表格见表 13-1，得到的谱曲线如图 12-11 中谱曲线所示。

4）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Response Spectrum2（C5）”，在工具栏中选择“RS Base Excitation”→“RS Displacement”，此时在树结构图中出现“RS Displacement2”对象。

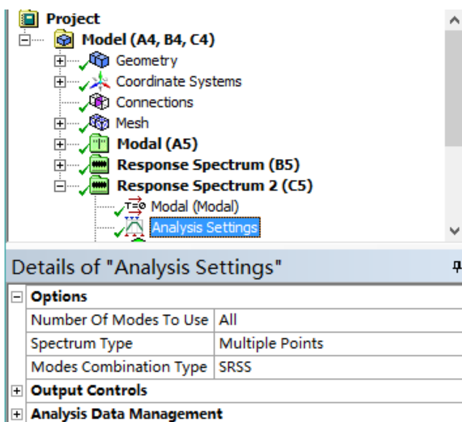


图 13-22　多点响应谱分析设置

5）在 RS Displacement 2 的细节窗口中设置“Direction”为“Y Axis”，设置表格见表 13-1，得到的谱曲线如图 12-11 中谱曲线所示。

2. 求解

在 Outline 树结构图中的“Response Spectrum 2”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

3. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（C6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，如图 13-23 所示，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，如图 13-24 所示，此时进行求解，求解后得到的等效应力云图如图 13-25 所示。

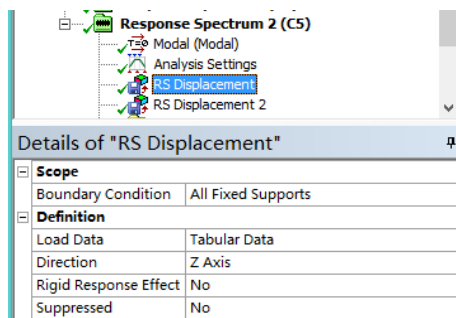


图 13-23　*Z* 向激励设置

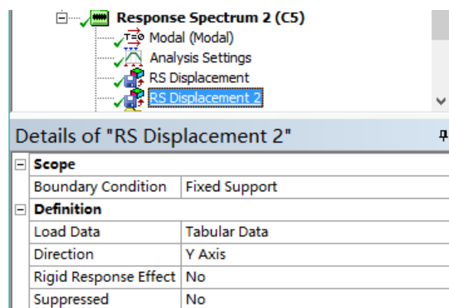


图 13-24　*Y* 向激励设置

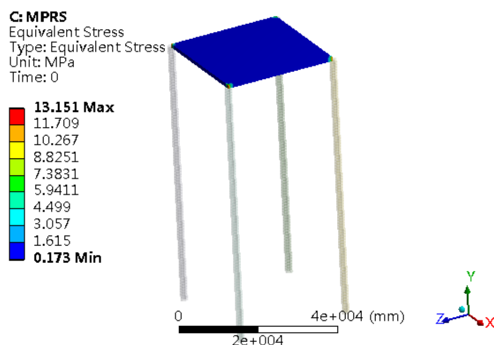


图 13-25　等效应力云图

5）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（C6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构图中会出现“Directional Deformation”对象。

6）设置 Directional Deformation 对象的细节窗口中的“Orientation”为“Y Axis”。

7）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（C6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

8）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构图中出现“Directional Deformation 2”对象。

9）设置 Directional Deformation 2 对象的细节窗口中的“Orientation”为“Z Axis”。

10）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 *Y* 向变形云图和 *Z* 向变形云图分别如图 13-26 和图 13-27 所示。

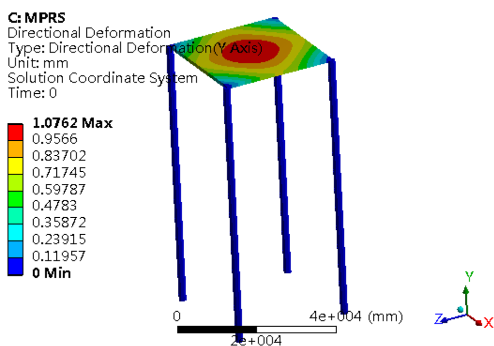


图 13-26　*Y* 向变形云图

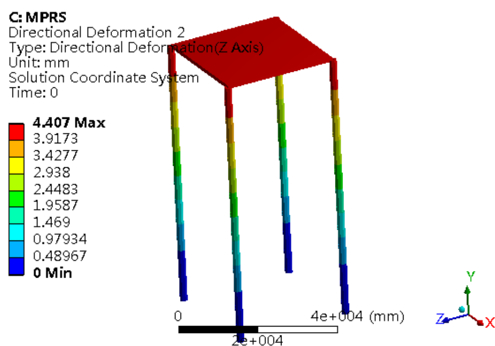


图 13-27　*Z* 向变形云图

4. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 13-28 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

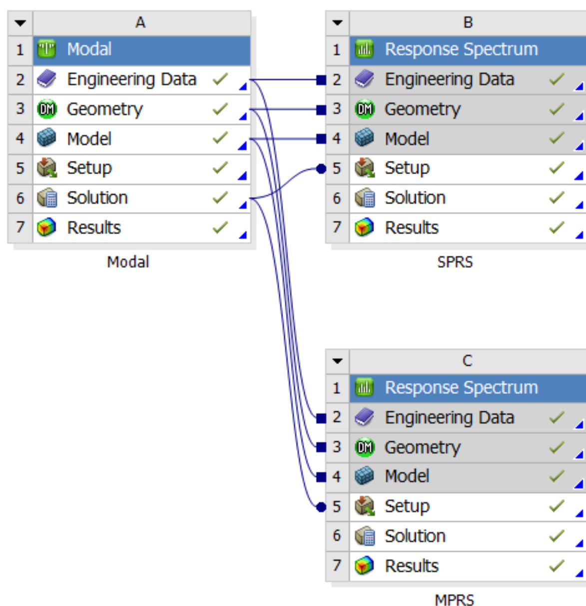


图 13-28　完成分析的项目工程图

13.3　本章小结

本章主要介绍了响应谱分析的操作流程。响应谱分析可以分为单点响应谱分析和多点响应谱分析，从整体流程上看，两种类型的响应谱分析操作过程类似。本章没有涉及响应谱分析的有关理论，读者在有需要的时候，应查阅帮助文档或有关书籍。

第 14 章 随机振动分析



随机振动是一种统计意义下描述的振动，其特点为：在任何给定的时刻，振动的幅值和相位均是不可知的。随机振动通过其振动幅值的统计特性进行描述，ANSYS Workbench 可以采用功率谱密度函数来对其进行分析。本章将介绍随机振动分析的操作过程。

学习目标：

- 掌握进行随机振动分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行随机振动分析。

14.1 随机振动分析基础

14.1.1 随机振动分析概述

假设所有随机过程为正态分布的平稳随机过程，确定失效的重要统计参数是均值、均方根和平均频率。在随机工作状态下，至少存在 3 种失效方式。

1）一次失效：即结构在承受的载荷超过一定水平时出现的一次性失效。

2）时间失效：即结构在工作超过一定水平时逐渐发生的失效。

3）累积损伤失效：损伤在结构中积累，直到完全破坏。

随机振动是计算以上各种失效的基础。

14.1.2 随机振动分析过程

随机振动分析的步骤如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

在进行随机振动求解前需要进行模态分析，并将模态分析的结果作为输入来求解随机振动分析。

14.2　随机振动分析示例

本节对随机振动分析的操作过程进行示例。通过对梁板结构的随机振动分析让读者掌握随机振动分析的基本过程，本示例的模型建立过程请参照前面的章节，在进行分析时直接导入即可。

14.2.1　问题描述

本示例为一典型的梁板结构，长宽均为 6m，高为 12m，其厚度均为 20mm，梁截面为I型，如图 14-1 所示。分析此结构在底部约束点随机载荷作用下的结构反应。

材料：选择系统默认的结构钢材料。

模型：Beam-floor.agdb。

载荷：随机载荷见表 14-1。

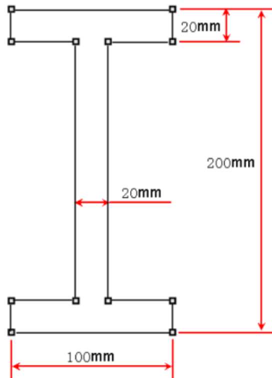


图 14-1　梁截面

表 14-1　随机载荷

Items	Frequency/Hz	Displacement/（mm^2/Hz）	Items	Frequency/Hz	Displacement /（mm^2/Hz）
1	0.5	0.01	5	17	0.005
2	1	0.02	6	18	0.01
3	2.4	0.016	7	20	0.015
4	3.8	0.02	8	32	0.01

14.2.2　建立分析项目

步骤 01　在 Windows 资源管理器中双击几何模型文件“beam-floor.agdb”，此时会出现几何模型项目。

步骤 02　利用前面章节介绍的方法创建模态分析及随机振动分析项目，创建后的分析项目如图 14-2 所示。

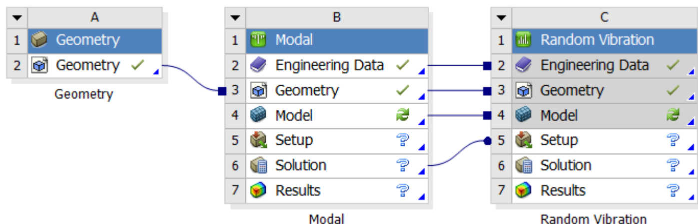


图 14-2　建立分析项目

14.2.3 修改模型

1．删除多余的边

步骤01 双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，此时会进入到 DM 界面，在图形窗口中会显示如图 14-3 所示的几何模型。

步骤02 在图形窗口的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“View”→“Right View”命令，如图 14-4 所示，此时的图形界面如图 14-5 所示。

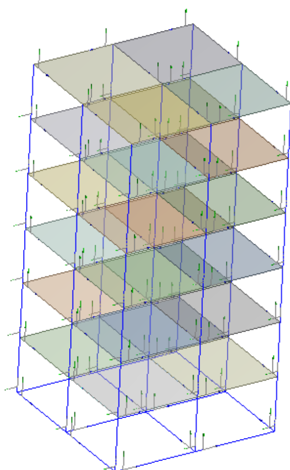


图 14-3 几何模型

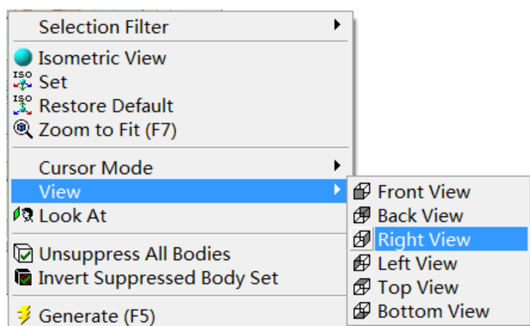


图 14-4 快捷菜单

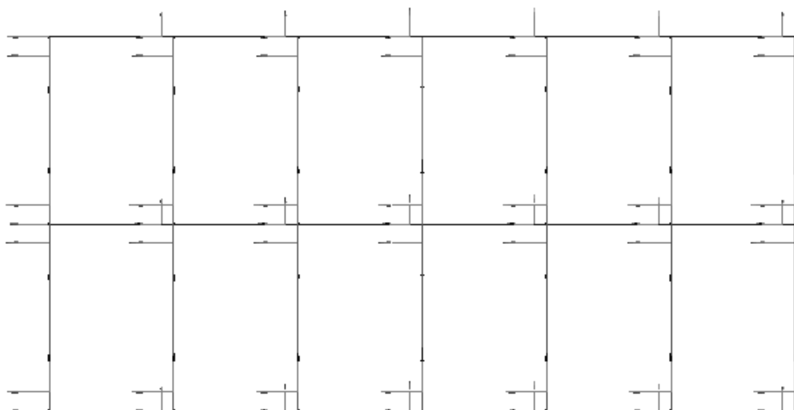


图 14-5 图形界面

步骤03 清理多余的边线，如图 14-6 所示选择菜单栏中的“Create”→“Edge Delete”命令，此时分析树中会出现如图 14-7 所示的“EDelete2”。

步骤04 单击图形工具栏中选择模式下的“Box Select”（框选）按钮，然后再单击“选择边”按钮，选择如图 14-8 所示的边。



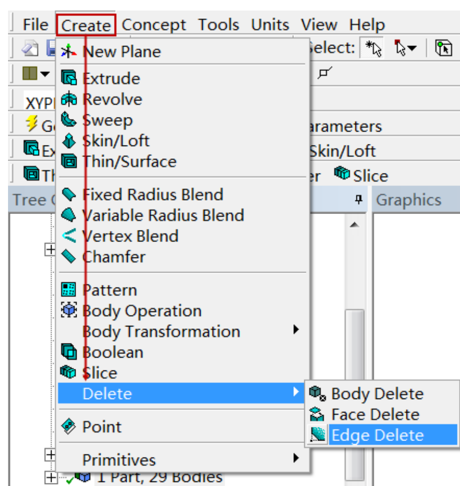


图 14-6　执行“Edge Delete”命令

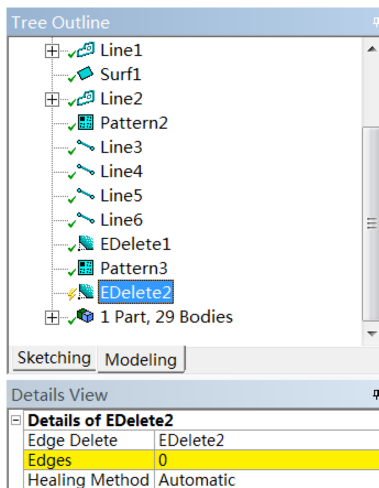


图 14-7　显示“EDelete2”的分析树

步骤 05　在参数设置列表中单击“Edges”后的“Apply”按钮，完成边的选择，此时显示选中了 12 条边，如图 14-9 所示。

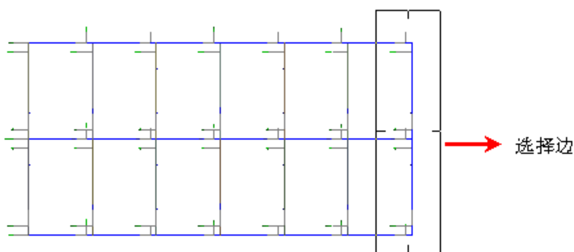


图 14-8　选择边

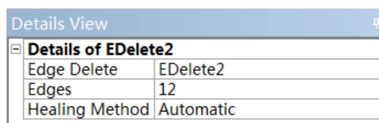


图 14-9　参数设置列表

步骤 06　在分析树中的“EDelete2”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate”命令，如图 14-10 所示，此时的图形界面如图 14-11 所示，选中的边已被删除。

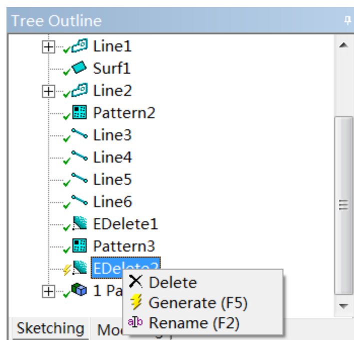


图 14-10　快捷菜单

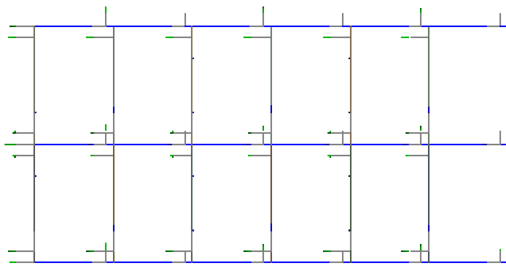


图 14-11　图形界面

2. 设置梁截面尺寸

步骤 01　选择菜单栏中的“Concept”（概念）→“Cross Section”（横截面）→“I Section”

（工字截面）命令，如图 14-12 所示，为线体创建横截面。在参数列表中设置各参数，如图 14-13 所示。

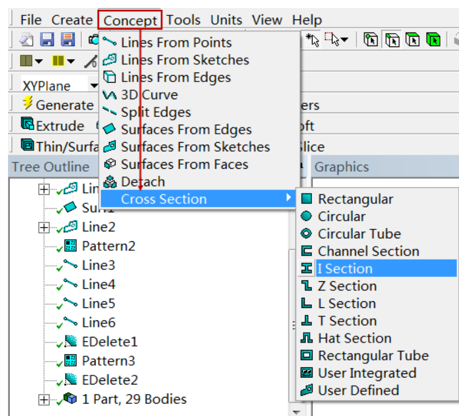


图 14-12 创建横截面操作

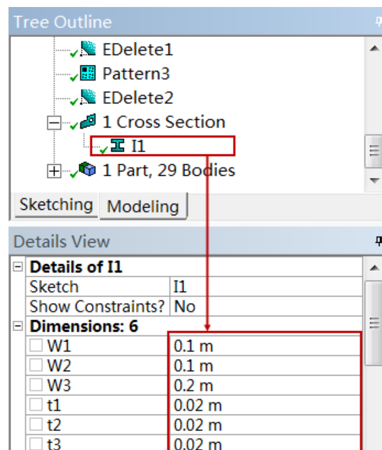


图 14-13 设置横截面参数

步骤 02 在设计树中单击“29 Parts，29 Bodies”前的“展开”按钮，展开所有的体。

步骤 03 选择线体“Line Body”，并在参数列表中的“Cross Section”中选择“I1”作为线体的横截面属性，如图 14-14 所示。

3. 抑制底面

步骤 01 单击图形工具栏中选择模式下的“Box Select”（框选）按钮，然后再单击“选择面”按钮，选择如图 14-15 所示的面。

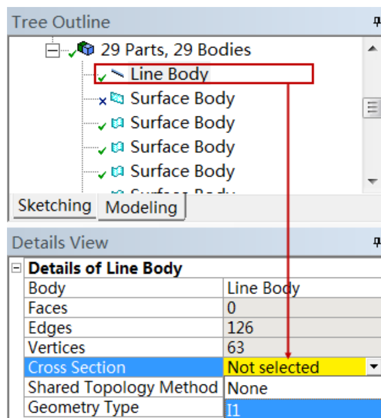


图 14-14 设置横截面属性

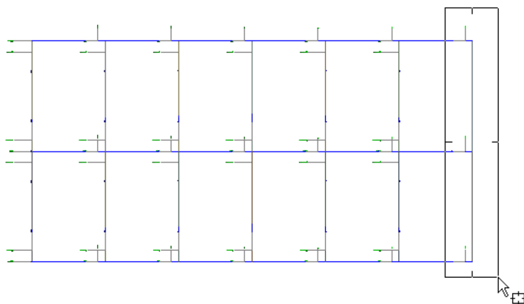


图 14-15 选择面

步骤 02 在图形窗口中右击，在弹出的快捷菜单中选择“Suppress Body”命令，如图 14-16 所示，此时选中的面即可被抑制，如图 14-17 所示，被抑制的面选项前由变为。

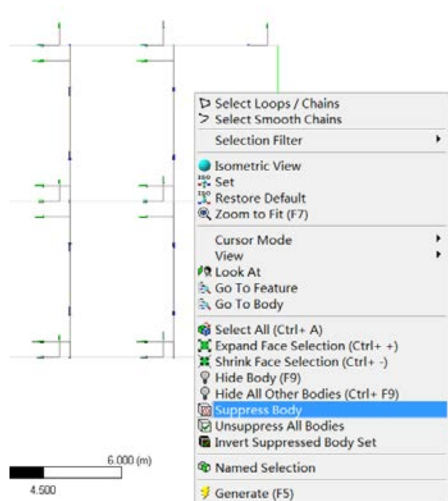


图 14-16　快捷菜单

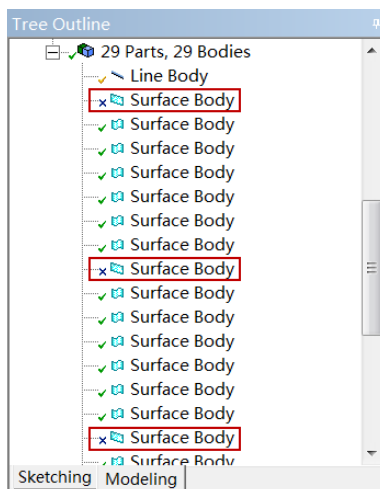


图 14-17　抑制面

4．设置面体厚度

步骤 01　选择“29 Parts，29 Bodies”列表下的第一个面体后，按下〈Shift〉键，同时拖动滚动条到所有体的最后，单击最后一个面体，即可将所有的面体选中，如图 14-18 所示。

步骤 02　在参数设置列表中的“Thickness”内输入“0.02”，即面体厚度为 20mm，如图 14-19 所示。

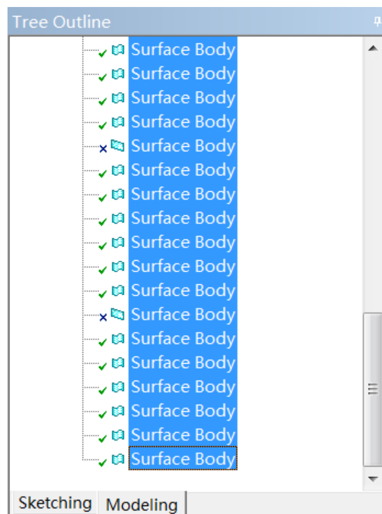


图 14-18　选中所有的面体

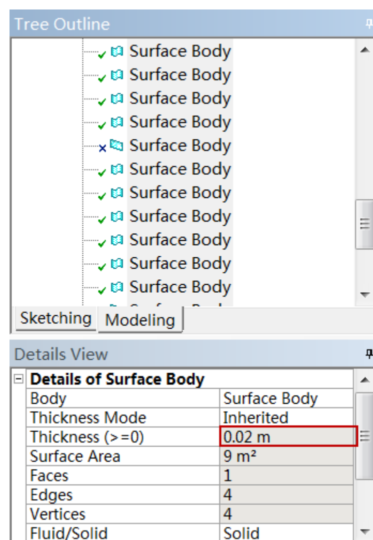


图 14-19　设置面体厚度

14.2.4 生成多体部件体

步骤 01　选择“29 Parts，29 Bodies”列表下的第一个体——线体后，按住〈Shift〉键，同

时拖动滚动条到所有体的最后，单击最后一个体，即可将所有的体选中。

步骤02 执行菜单栏中的“Tools”（工具）→“Form New Part”（构成新部件）命令，或者如图 14-20 所示，在选中的体上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Form New Part”（构成新部件）命令，即可创建多体部件体。



此时的模型只有一个体，该体包括了 29 个零件，如图 14-21 所示。

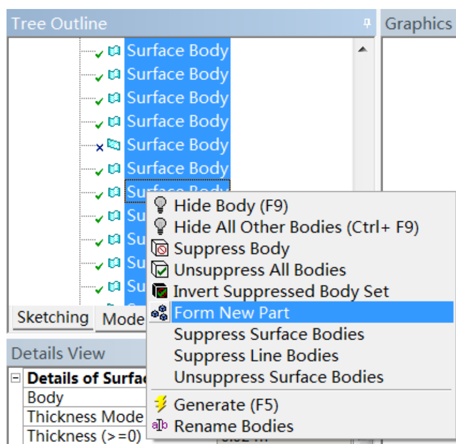


图 14-20 快捷菜单

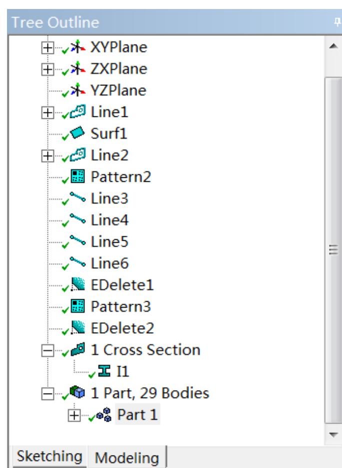


图 14-21 生成多体部件体

步骤03 单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮，退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

14.2.5 划分网格

步骤01 双击项目管理区项目 B 中的 B4 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

步骤02 选中分析树中的“Mesh”项，选择 Mesh 工具栏中“Mesh Control”（网格控制）→“Sizing”（尺寸）命令，如图 14-22 所示，为网格划分添加尺寸控制，如图 14-23 所示。

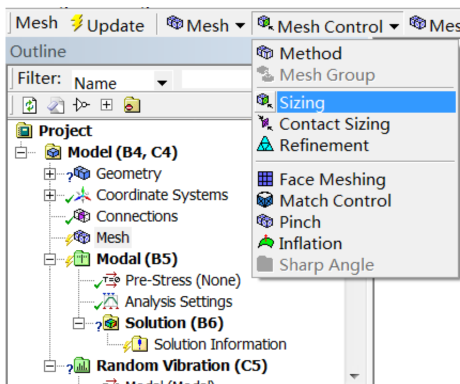


图 14-22 添加“尺寸”命令

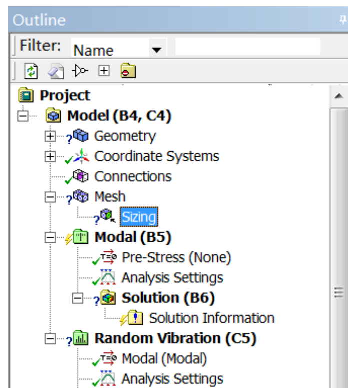


图 14-23 分析树中的尺寸控制

步骤 03 单击图形工具栏中的“选择边”按钮，选择菜单栏中的“Edit”（编辑）→“Select All”（选择所有）命令，选择所有的线体，此时线体颜色显示为绿色，如图 14-24 所示。

步骤 04 在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成边的选择，并设置“Element Size”为 0.2mm，如图 14-25 所示，图形显示如图 14-26 所示。

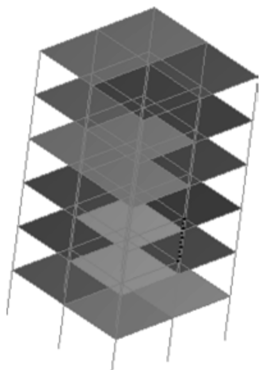
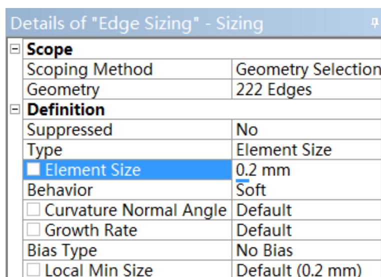


图 14-24 选择线体



Details of "Edge Sizing" - Sizing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	222 Edges
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	0.2 mm
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	Default
Bias Type	No Bias
Local Min Size	Default (0.2 mm)

图 14-25 参数设置

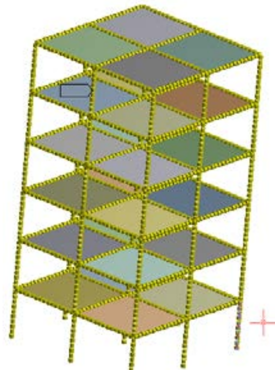


图 14-26 图形显示



在Mechanical中，没有设置单位，故而单位为m。

步骤 05 选中分析树中的“Mesh”项，单击 Mesh 工具栏中“Mesh Control”（网格控制）→“Mapped Face Meshing”（绘制面网格）命令，如图 14-27 所示，为网格划分添加面网格控制，如图 14-28 所示。

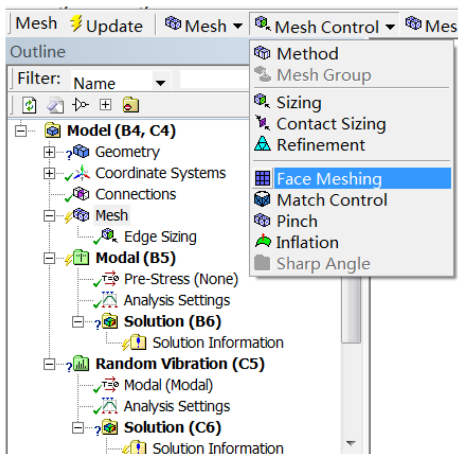


图 14-27 选择“绘制面网格”命令

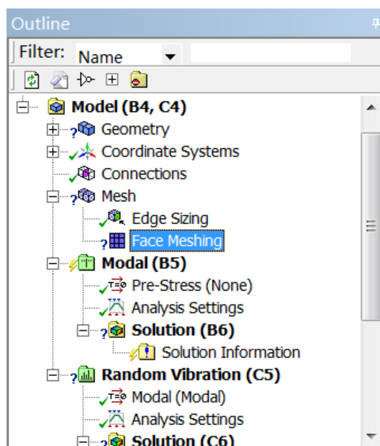


图 14-28 添加面网格控制

步骤 06 同步骤（03），在图形选择过滤器中单击“选择面”按钮，选择菜单栏中的“Edit”（编辑）→“Select All”（选择所有）命令，选择所有的面体，此时面体颜色显示为绿色，如图 14-29 所示。

步骤07 在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成面的选择，共选择24个面，设置“Method”为“Quadrilaterals”（四边形）网格，如图14-30所示。

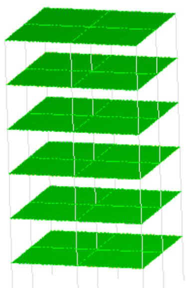


图14-29 选择面体

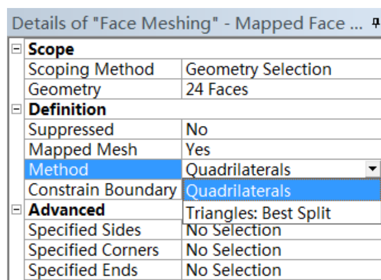


图14-30 参数设置

步骤08 使用同样的方法，为所有的面添加网格尺寸控制，网格尺寸为“0.2m”，参数设置如图14-31所示。

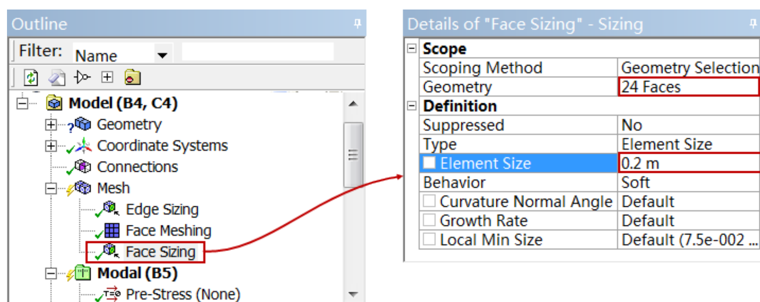


图14-31 为面添加网格尺寸控制

步骤09 在Outline（分析树）中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，此时会弹出如图14-32所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图14-33所示。

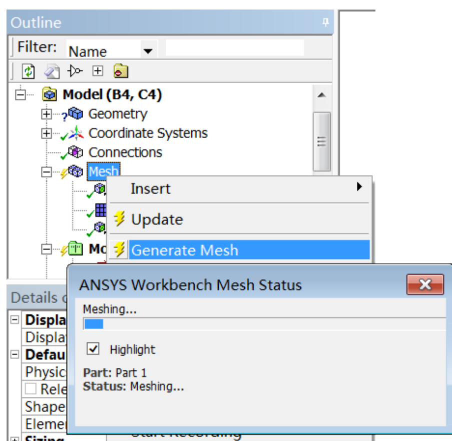


图14-32 求解快捷菜单



图14-33 网格效果

14.2.6 施加固定约束

步骤 01 选中分析树中的“Modal（B5）”项，单击 Environment 工具栏中“Supports”（约束）→“Fixed Support”（固定约束）命令，为模型添加固定约束，如图 14-34 所示。

步骤 02 在图形窗口的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“View”→“Left”命令，如图 14-35 所示。

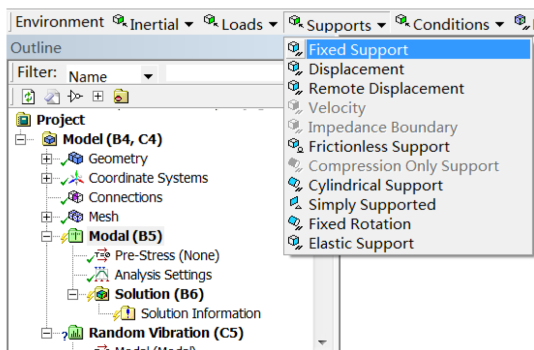


图 14-34 添加固定约束

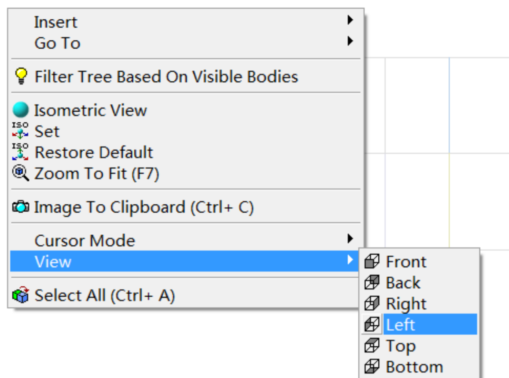


图 14-35 调节视图视角

步骤 03 单击图形工具栏中选择模式下的“Box Select”（框选）按钮，然后再单击“选择点”按钮，选择底部点。

步骤 04 在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成底部点的选择，施加固定约束后的图形效果如图 14-36 所示。

14.2.7 提取模态参数设置

步骤 01 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

步骤 02 选择 Solution 工具栏中的“Deformation”（变形）→“Total”（总变形）命令，如图 14-37 所示，此时在分析树中会出现“Total Deformation”选项。

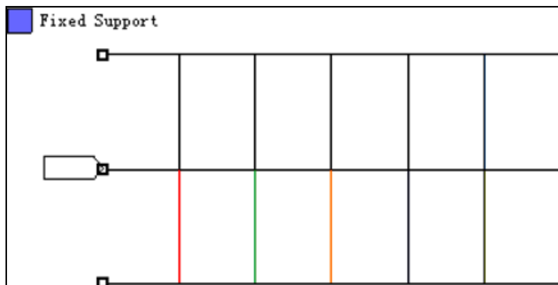


图 14-36 施加固定约束后的图形效果

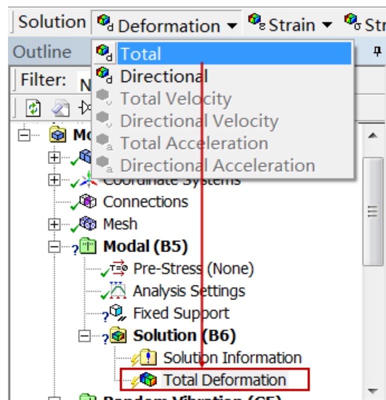


图 14-37 添加变形求解项

步骤 03 单击〈F2〉键，然后修改“Total Deformation”的名称为“1th Modal”，并在参数列表中设置提取模态数为“1”，如图 14-38 所示。

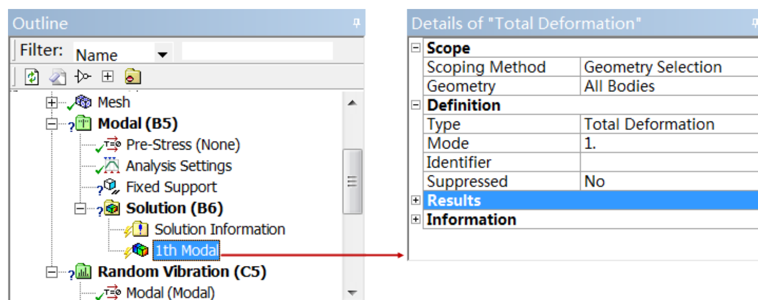


图 14-38 设置提取模态数

步骤 04 使用同样的方法设置提取前六阶模态数：“2th Modal”“3th Modal”“4th Modal”“5th Modal”“6th Modal”，如图 14-39 所示，它们分别对应二阶、三阶、四阶、五阶、六阶模态数。

步骤 05 在 Outline（分析树）中的“Solution（B6）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡“Solve”命令，如图 14-40 所示，此时会弹出求解进度条，表示正在求解，当求解完毕后，进度条自动消失。

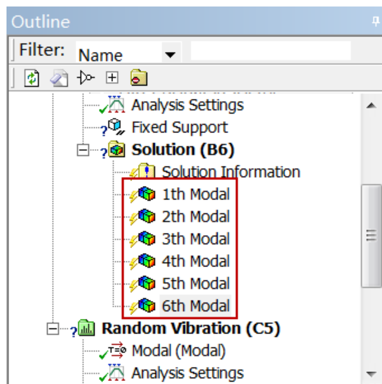


图 14-39 设置提取六阶模态数

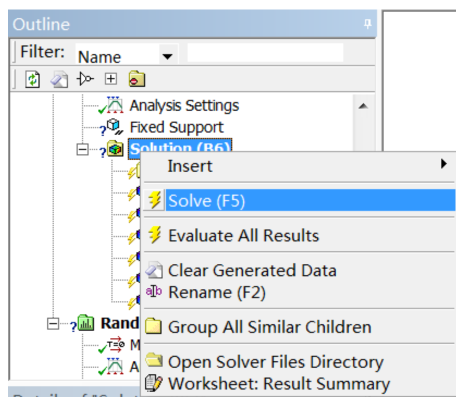


图 14-40 执行“求解”快捷命令

14.2.8 查看模态分析结果

步骤 01 在 Mechanical 界面中选择“Units”（单位）→“Metric（kg,mm,s,℃,mA,N,mV）”命令，设置模态分析结果的显示单位。

步骤 02 求解完成后，选择分析树中“Solution（B6）”后的“1th Modal”，可以观察模态分析的一阶模态振型及固有频率，如图 14-41 所示。

步骤 03 使用同样的方法查看“2th Modal”“3th Modal”“4th Modal”“5th Modal”和“6th Modal”对应的二阶、三阶、四阶、五阶及六阶模态振型及固有频率，如图 14-42～图 14-46 所示。

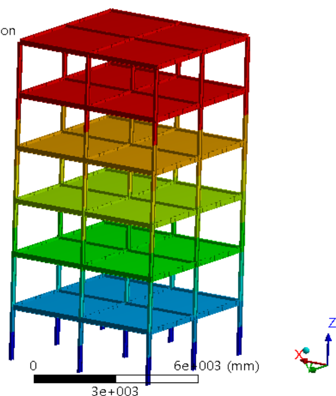


图 14-41　一阶模态振型

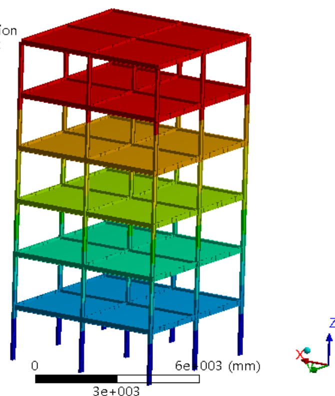


图 14-42　二阶模态振型

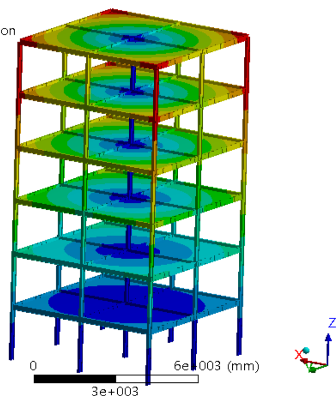


图 14-43　三阶模态振型

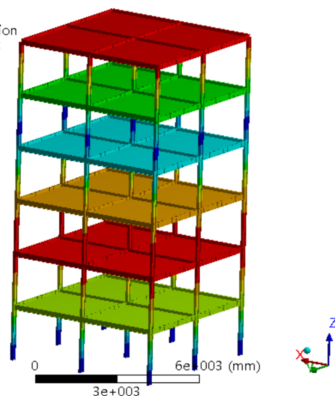


图 14-44　四阶模态振型

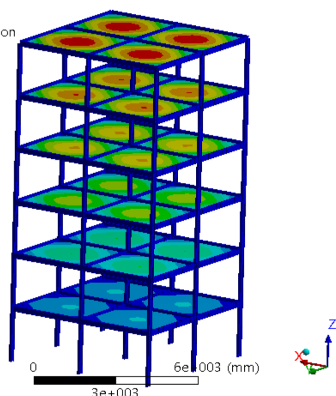


图 14-45　五阶模态振型

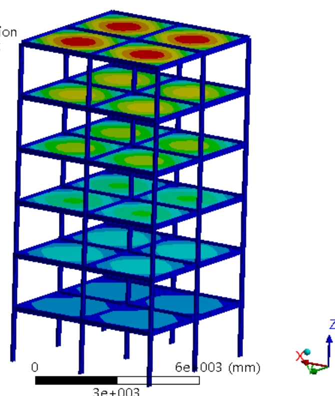
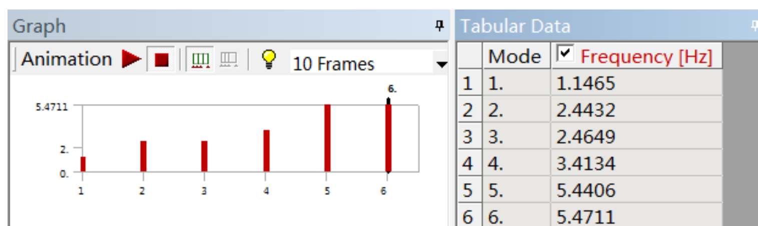


图 14-46　六阶模态振型

步骤 04　在图形窗口的下方可以观察到前六阶振型的固有频率，如图 14-47 所示。



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	1.1465
2	2.	2.4432
3	3.	2.4649
4	4.	3.4134
5	5.	5.4406
6	6.	5.4711

图 14-47　前六阶振型的固有频率

14.2.9　添加功率谱位移

步骤 01　选中分析树中的“Random Vibration（C5）”项，单击 Environment 工具栏中“PSD Base Excitation”→“PSD Displacement”命令，为模型添加 *X* 方向的功率谱位移，如图 14-48 所示。

步骤 02　在参数设置列表中的“Boundary Condition”参数下选择“Fixed Support”，在“Load Data”参数下选择“Tabular Data”，如图 14-49 所示。

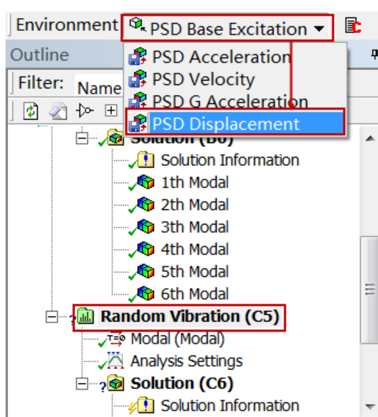


图 14-48　添加功率谱位移

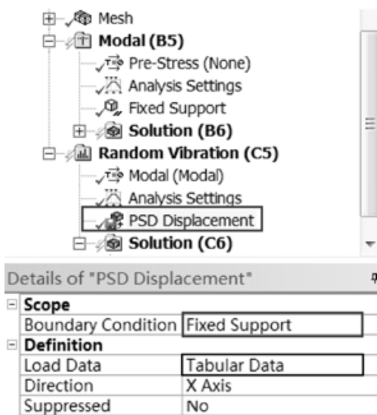
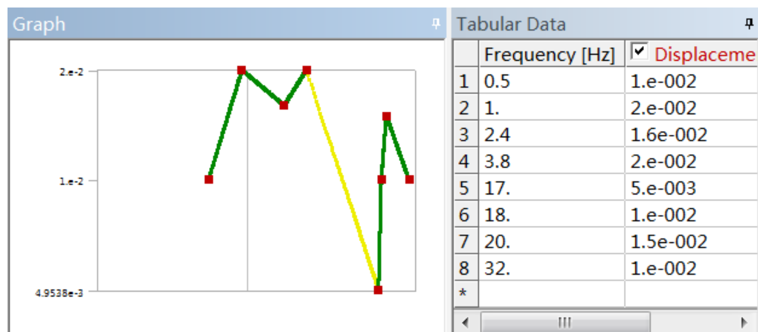


图 14-49　参数设置

步骤 03　在图形窗口下方的 Tabular Data 栏中输入响应的随机载荷，如图 14-50 所示。



	Frequency [Hz]	Displaceme
1	0.5	1.e-002
2	1.	2.e-002
3	2.4	1.6e-002
4	3.8	2.e-002
5	17.	5.e-003
6	18.	1.e-002
7	20.	1.5e-002
8	32.	1.e-002
*		

图 14-50　响应随机载荷

14.2.10 提取随机振动的分析结果

1. 整体分析

步骤 01 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的“Solution（C6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

步骤 02 选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional Velocity”命令，如图 14-51 所示，此时在分析树中会出现“Directional Velocity”选项，参数列表设置为默认值。

步骤 03 使用同样的方法在分析树中添加“Directional Acceleration”，参数列表设置为默认值。

步骤 04 选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”命令，如图 14-52 所示，此时在分析树中会出现“Equivalent Stress”选项，参数列表设置为默认值。

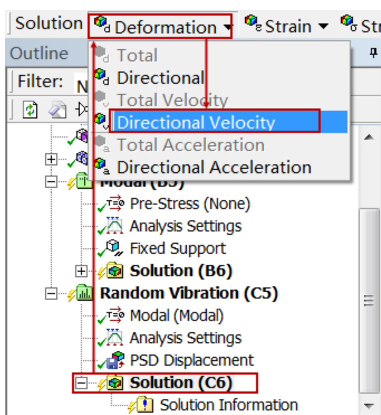


图 14-51 添加 *X* 方向的速度响应求解项

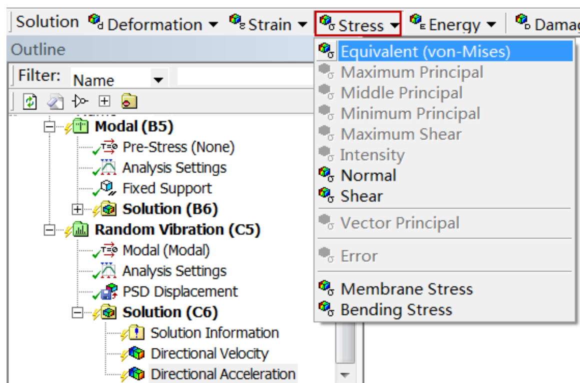


图 14-52 添加等效应力求解项

步骤 05 在 Outline（分析树）中的“Solution（C6）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”命令，此时会弹出求解进度条，表示正在求解，当求解完毕后，进度条自动消失。

2. 局部分析

步骤 01 选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional Velocity”命令，此时在分析树中会出现“Directional Velocity 2”选项。

步骤 02 在图形选择过滤器中单击“选择面”按钮，选择菜单栏中的“Edit”（编辑）→“Select All”（选择所有）命令，选择所有的面体。

步骤 03 在参数设置列表中单击“Geometry”后的“Apply”按钮，完成面的选择，共选择 24 个面，如图 14-53 所示。

步骤 04 采用同样的方法设置“Directional Acceleration 2”“Equivalent Stress 2”，用来求解所有面在 *X* 方向上的加速度及等效应力，如图 14-54 所示。

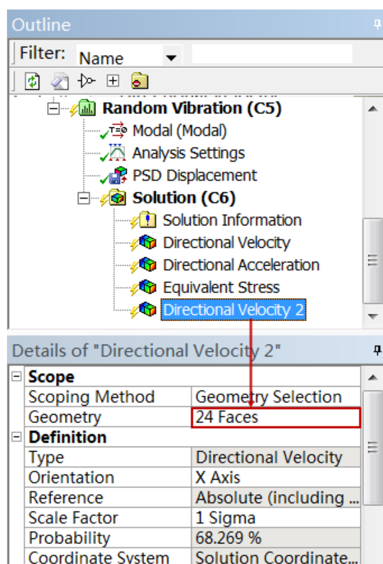


图 14-53 参数设置列表

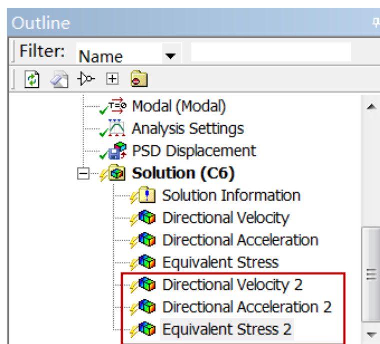


图 14-54 分析树



通过在参数设置列表中设置不同方向上的响应项，可以观察相关项在各方向上的响应云图，这里只设置为X方向上的响应。

14.2.11 查看随机振动的分析结果

1. 局部分析

步骤01 求解完成后，选择分析树中“Solution（C6）”后的“Directional Velocity”，可以观察随机振动分析 *X* 方向的速度响应云图，如图 14-55 所示。

步骤02 选择分析树中“Solution（C6）”后的“Directional Acceleration”，可以观察随机振动分析 *X* 方向的加速度响应云图，如图 14-56 所示。

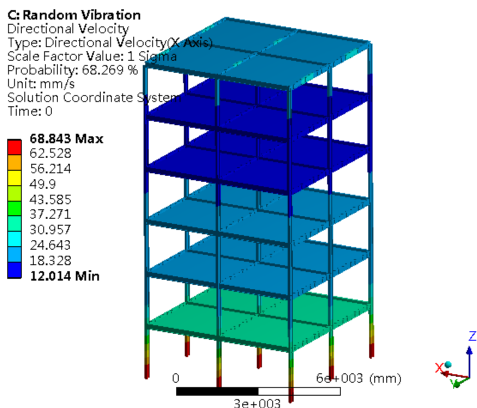


图 14-55 速度响应云图

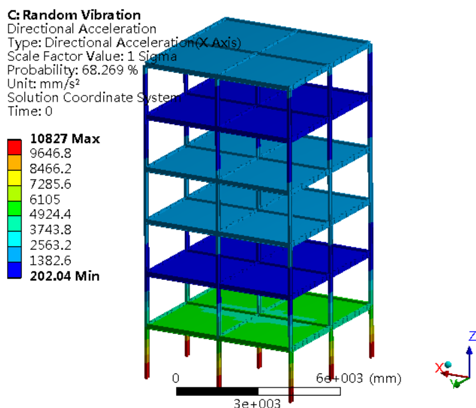


图 14-56 加速度响应云图

步骤03 选择分析树中“Solution（C6）”后的“Equivalent Stress”，可以观察随机振动分析 X 方向的等效应力响应云图，如图 14-57 所示。

2．整体分析

步骤01 选择分析树中“Solution（C6）”后的 Directional Velocity 2，可以观察到随机振动分析所得 X 方向所有面的速度响应云图，如图 14-58 所示。

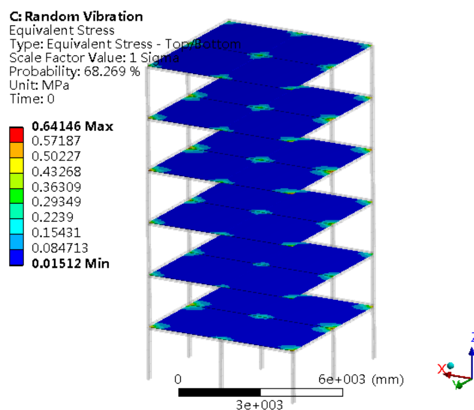


图 14-57 等效应力响应云图

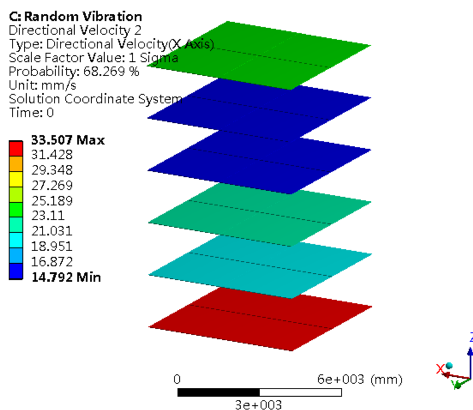


图 14-58 所有面的速度响应云图

步骤02 选择分析树中“Solution（C6）”后的“Directional Acceleration 2”，可以观察到随机振动分析所得 X 方向所有面的加速度响应云图，如图 14-59 所示。

步骤03 选择分析树中“Solution（C6）”后的“Equivalent Stress 2”，可以观察到随机振动分析所得 X 方向所有面的等效应力响应云图，如图 14-60 所示。

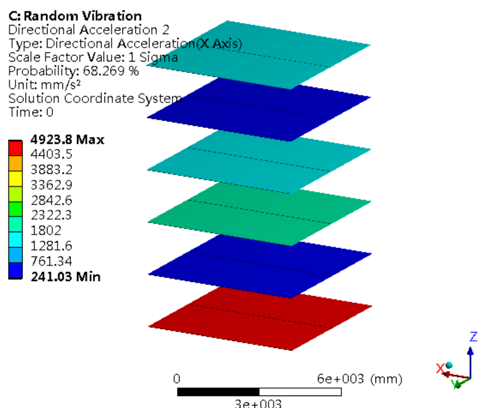


图 14-59 所有面的加速度响应云图

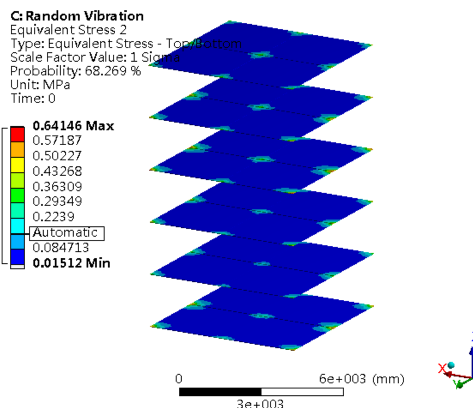


图 14-60 所有面的等效应力响应云图

14.2.12 保存与退出

步骤01 单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮 ✕ 退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。此时项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 14-61 所示。

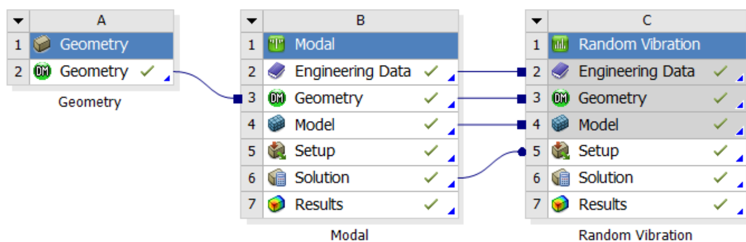


图 14-61 项目管理区中的分析项目

步骤 02 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

步骤 03 单击主界面右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench，完成项目分析。

14.3 本章小结

本章介绍了使用 ANSYS Workbench 进行随机振动分析的基本操作流程，其分析过程与其他分析过程大同小异。随机振动的理论很复杂，本章没有涉及，用户在需要时还可参考随机振动有关书籍和帮助文档来确保随机振动分析设置正确，并读懂结果。

第 15 章　显式动力学分析

显式动力学分析可以用来确定结构承受时变载荷产生的动力学响应情况。其分析的时间尺度短，较瞬态分析而言具有自身独特的优势。本章将介绍在 ANSYS Workbench 17.0 中进行显式动力学分析的基本操作过程。

学习目标：

- 理解进行显式动力学分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行显式动力学分析。

15.1　显式动力学分析基础

15.1.1　显式动力学概述

ANSYS Workbench 17.0 提供了 3 大模块进行显式动力学分析：

1）ANSYS Explicit Dynamics——该模块可以充分利用 Workbench 高效的前处理技术，方便地实现与其他模块数据共享。

2）ANSYS AUTODYN——该模块是一个显式有限元分析程序，可以用来求解固体、液体和气体相互作用产生的高度非线性问题。

3）ANSYS LS-DYNA——该模块是一个以显式为主，隐式为辅的通用非线性动力有限元分析软件。

本章主要介绍使用 ANSYS Explicit Dynamics 进行显式动力学分析的过程。

15.1.2　显式动力学分析过程

显式动力学分析的基本操作过程如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

由于显式动力学分析为高度非线性分析，在设置的时候一定要注意设置合理的步长，以保证结果收敛。



15.2 显式动力学分析示例

本节通过示例介绍显示动力学分析的基本过程。

15.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Explicit Dynamics”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 15-1 所示。

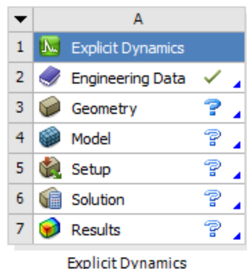


图 15-1 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入如图 15-2 所示的工程数据界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

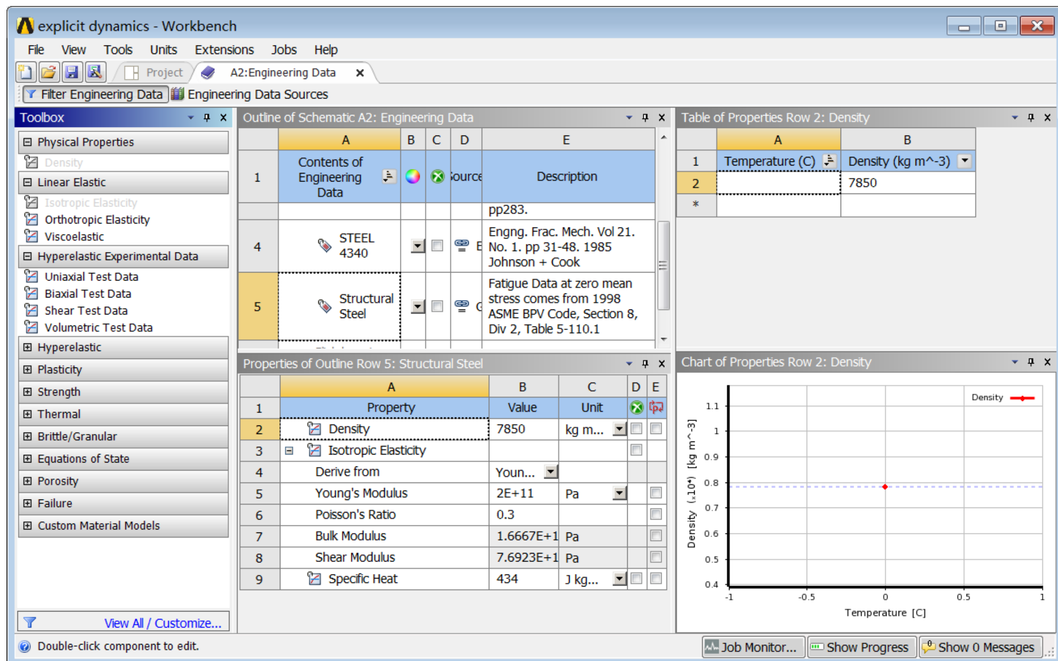


图 15-2 工程数据界面

2）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，此时原界面窗口中的 Outline of Schematic A2:Engineering Data 消失，Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 窗口出现，如图 15-3 所示。

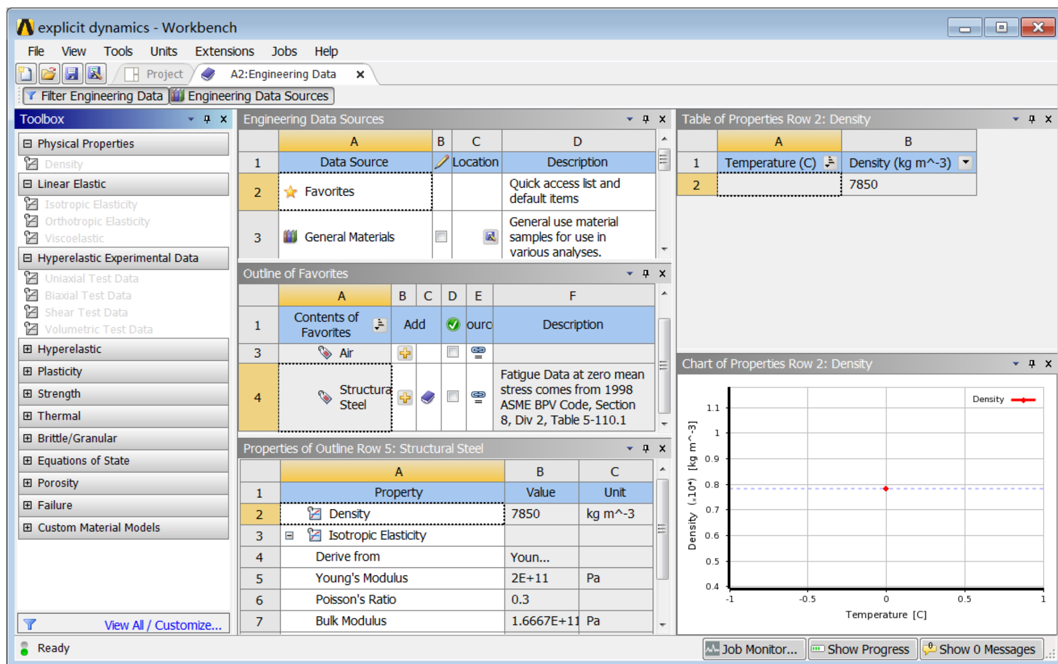


图 15-3　工程数据库界面

3）单击 Engineering Data Sources 窗口中的“Explicit Materials”，此时 Outline 窗口将显示为 Outline of Explicit Material，如图 15-4 所示。

4）在 Outline of Explicit Material 窗口中，选择“STEEL 4340”，并单击后面的添加符号。

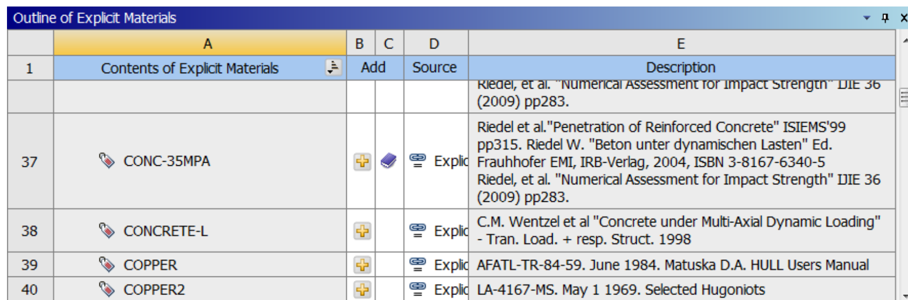


图 15-4　Explicit Material 概览窗口

5）在 Outline of Explicit Material 窗口中，选择“CONC-35MPA”，然后单击后面的添加符号。

6）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，返回到初始界面中，此时 Outline of Schematic A2 窗口中显示添加的“STEEL 4340”和“CONC-35MPA”，如图 15-5 所示。

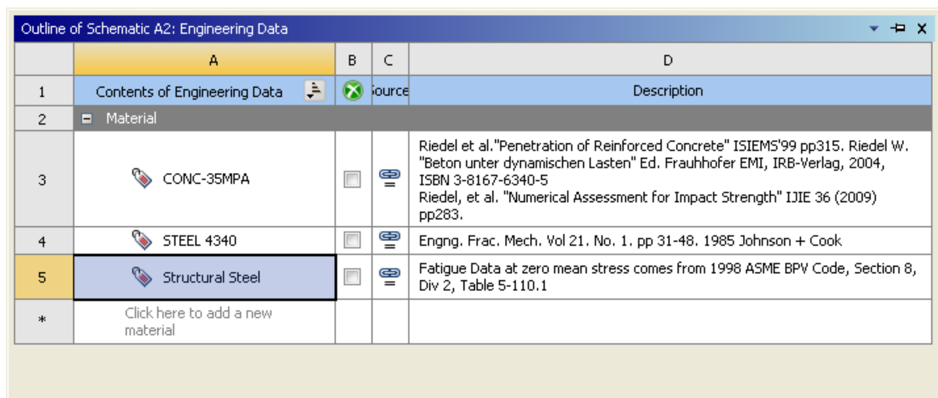


图 15-5　已添加的材料

7）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap15”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面，如图 15-6 所示，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

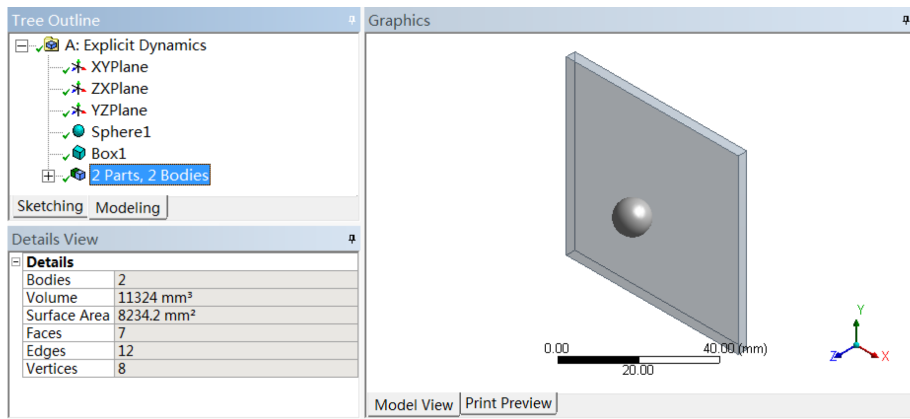


图 15-6　DM 模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮口退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，分析项目树结构图如图 15-7 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。



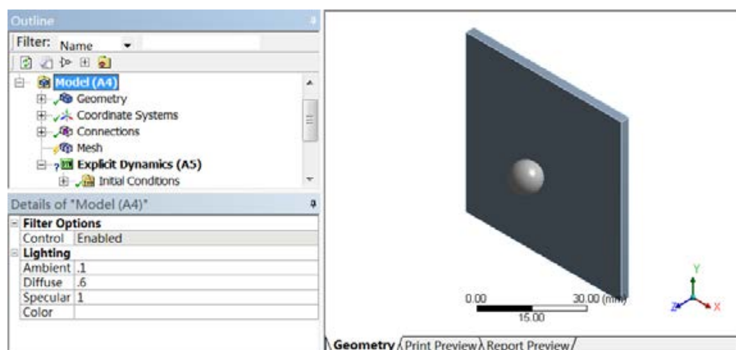


图 15–7　分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 1 个“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择“STEEL 4340”即可将其添加到模型中，如图 15–8 所示。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。

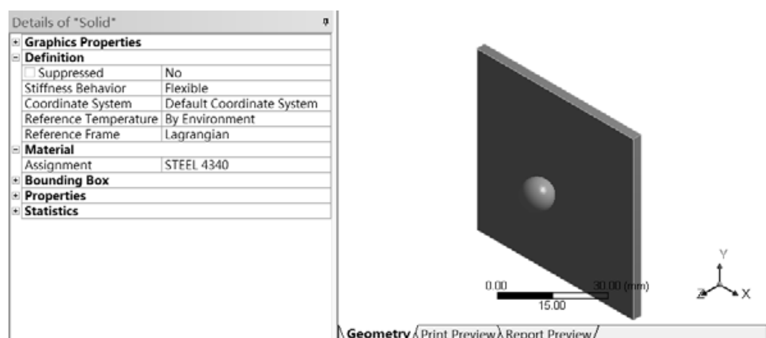


图 15–8　为圆球添加材料

4）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 2 个“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

5）单击参数列表中“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择“CONC-35MPA”即可将其添加到模型中，如图 15–9 所示。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。

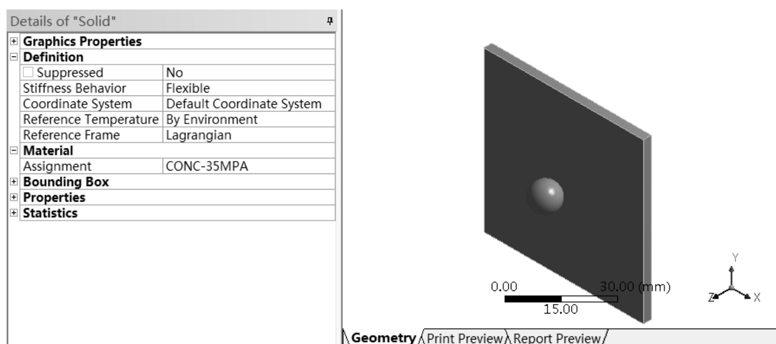
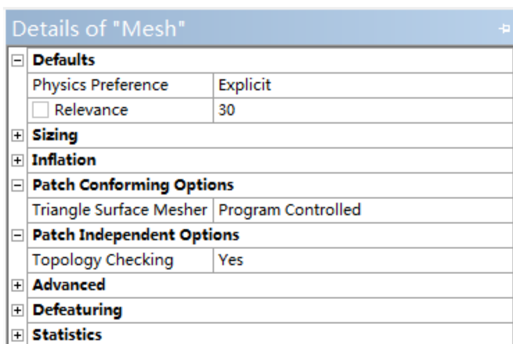


图 15–9　为壁面添加材料

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of “Mesh”细节窗口中修改网格参数“Relevance”为“30”，如图 15-10 所示。

2）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 15-11 所示。



Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Explicit
Relevance	30
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 15-10　网格控制

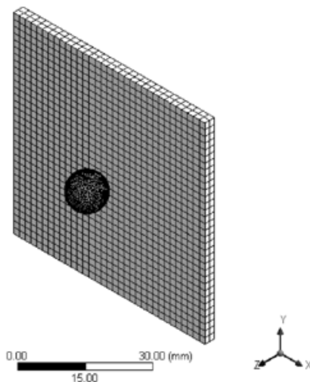
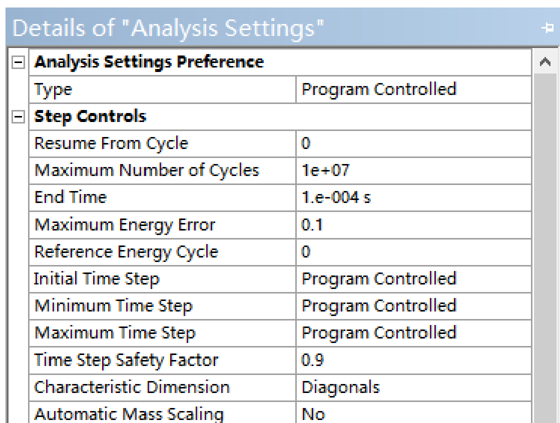


图 15-11　网格模型

6. 设置分析选项

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项，设置细节窗口中的参数，如图 15-12 所示。



Details of "Analysis Settings"

Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
Step Controls	
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
End Time	1.e-004 s
Maximum Energy Error	0.1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0.9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No

图 15-12　分析选项设置

7. 设置初始条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Initial Condition”，然后在工具栏中单击“Velocity”，此时树结构图中出现“Velocity”对象。

2）在 Velocity 对象的细节窗口中设置 *Z* 向速度为“-3.e+005mm/s”，在选择圆球后单击“Geometry”后的“Apply”按钮，得到结果如图 15-13 所示。



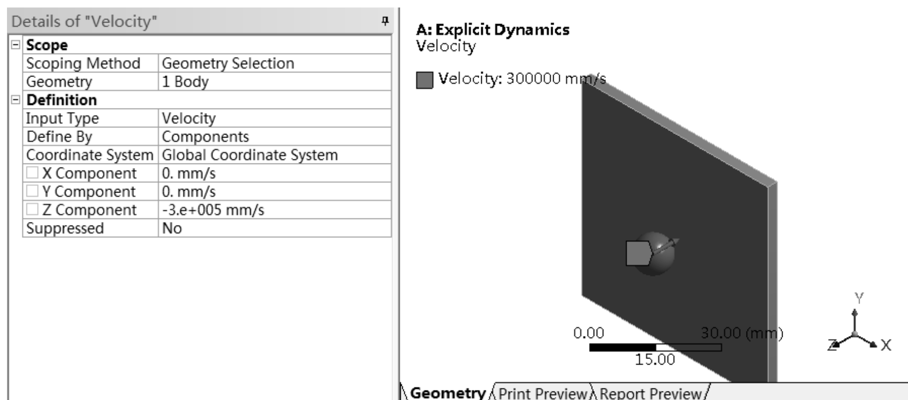


图 15-13　速度条件设置

8. 设置边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Explicit Dynamics（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选择“Fixed Support”，然后选择需要施加固定约束的板边缘的 4 个面，单击 Details of“Fixed Support”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中面上施加固定约束。

4）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Explicit Dynamics（A5）”选项，查看边界条件设置效果，如图 15-14 所示。

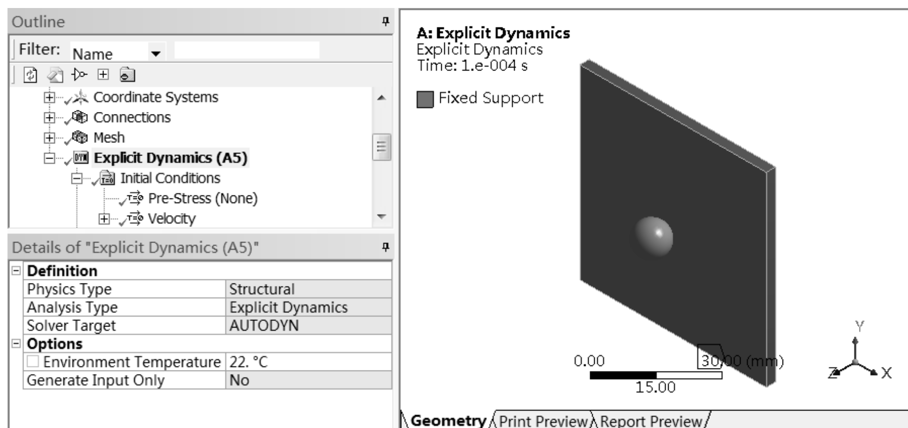


图 15-14　边界条件示意图

15.2.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Explicit Dynamics（A5）”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解

完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

15.2.3 后处理

1. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，如图 15-15 所示，此时在树结构图中会出现“Directional Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，单击 Details of“Directional Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，然后设置细节窗口参数，如图 15-16 所示，此时添加 *Z* 向变形的等值线云图。

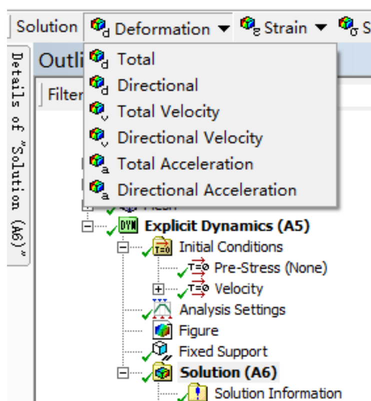
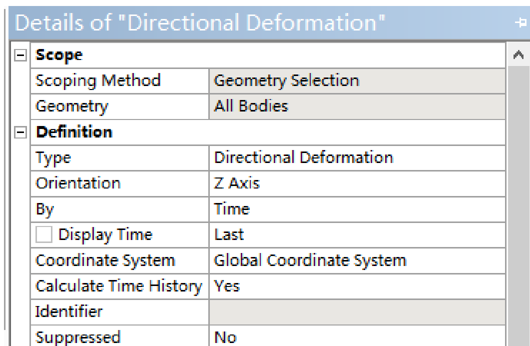


图 15-15 添加变形图

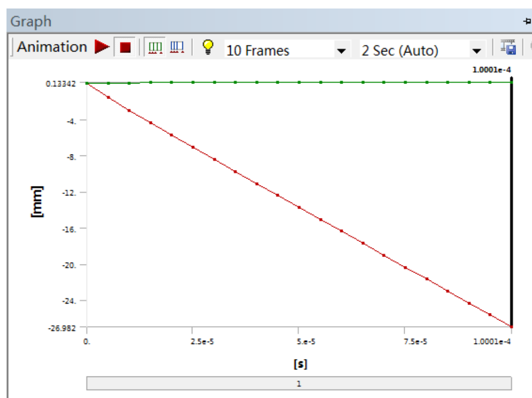


Details of "Directional Deformation"

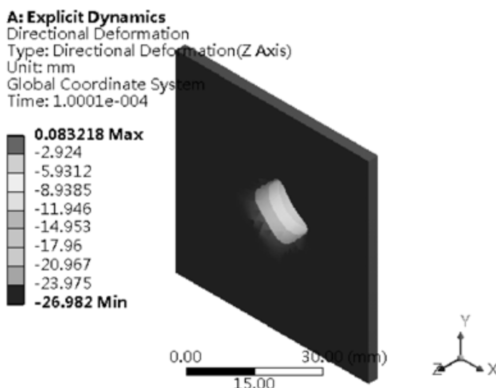
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Directional Deformation
Orientation	Z Axis
By	Time
Display Time	Last
Coordinate System	Global Coordinate System
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No

图 15-16 设置变形图

4）在 Outline 树结构图中的“Directional Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 *Z* 向位移结果如图 15-17 所示。



a)



b)

图 15-17 *Z* 向位移结果

a) *Z* 向位移历程 b) *Z* 向位移变形云图



5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，如图 15-18 所示，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

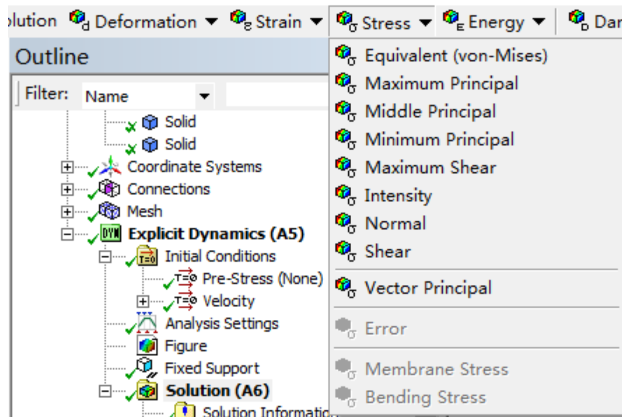
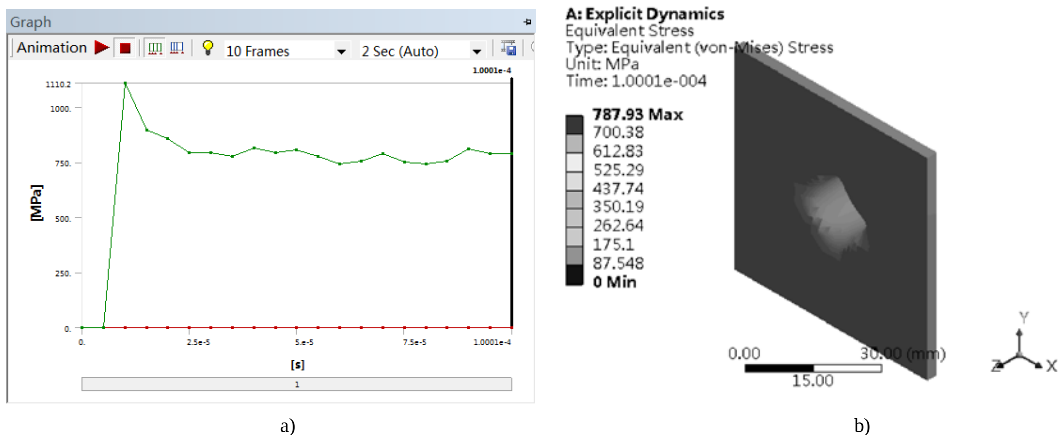


图 15-18　添加应力图

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力结果如图 15-19 所示。



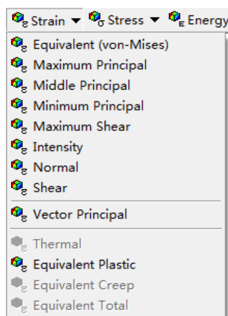
a)　b)

图 15-19　等效应力结果

a) 等效应力历程　b) 等效应力云图

8）选择 Solution 工具栏中的“Strain”→“Equivalent Plastic”，如图 15-20 所示，此时在树结构图中会出现“Equivalent Plastic Strain”选项。

9）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Plastic Strain”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply‘按钮，如图 15-21 所示。此时添加整体等效塑性应变的等值线云图。



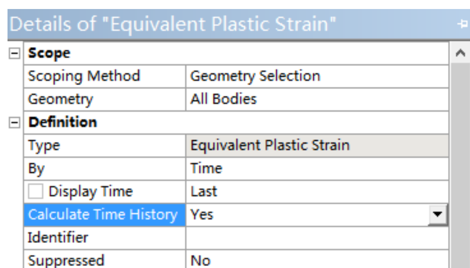
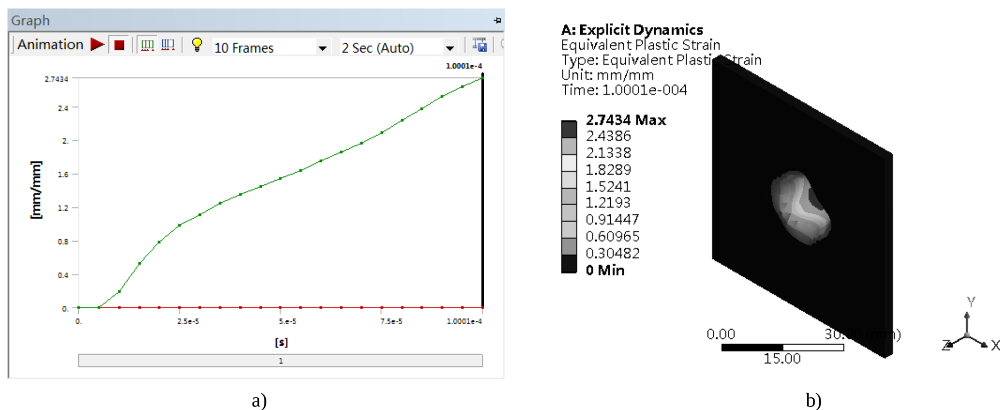


图 15-20　添加塑性应变图　　　　图 15-21　设置塑性应变图

10）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Plastic Strain”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效塑性应变结果如图 15-22 所示。



a)　　　　b)

图 15-22　等效塑性应变结果

a) 等效塑性应变历程　b) 等效塑性应变云图

2. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 15-23 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

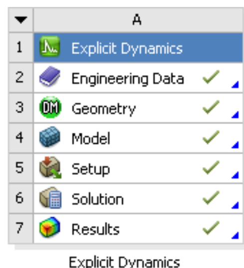


图 15-23　完成分析的项目工程图

15.3　本章小结

本章介绍了在 ANSYS Workbench 中使用 ANSYS Explicit Dynamics 进行显式动力学分析的基本操作过程。通过本章的学习，读者可以了解到软件操作的过程，但对于显式动力学分析所涉及的基本理论，还应参考帮助文档和有关书籍。

第 16 章　刚体运动学分析

ANSYS Workbench 17.0 提供了使用有限元模型创建刚体运动学系统，并对系统进行仿真。本章将介绍刚体运动学分析有关内容。

学习目标：

- 理解进行刚体运动学分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行刚体运动学分析。

16.1　刚体运动学分析过程

16.1.1　刚体运动学分析过程概览

刚体运动学的基本过程如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

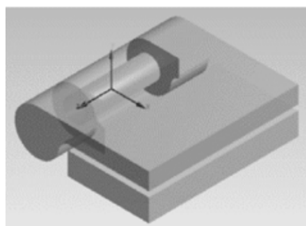
进行分析时，设置连接非常重要，因为其直接决定了分析模型是否正确。ANSYS Workbench 支持的连接类型如下文所述。另外，在结构中应定义质量或与质量相关的密度等，以保证动力学的响应情况正确。

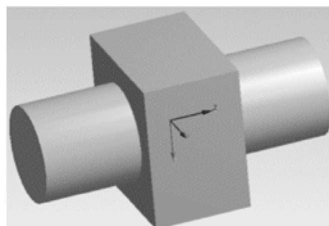
16.1.2　连接类型

ANSYS Workbench 提供的连接类型如下所述。各个连接均包含了其自身定义的自由度，用户可定义局部坐标系，保证连接的方向正确。

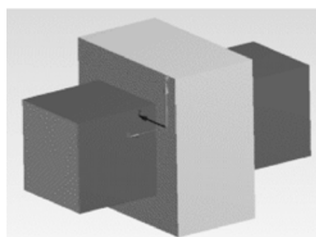
- Fixed Joint——固定连接，限制所有方向自由度。

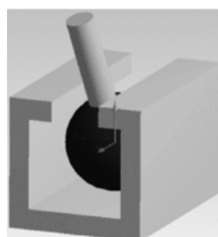
➢ Revolute Joint——旋转连接，限制 UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，如图 16–1 所示。
➢ Cylindrical Joint——圆柱连接，限制 UX，UY，ROTX，ROTY，如图 16–2 所示。


图 16–1　旋转连接

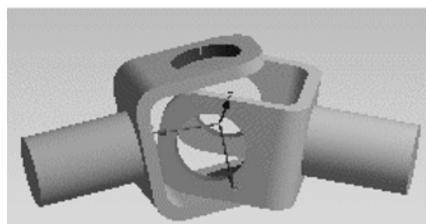

图 16–2　圆柱连接

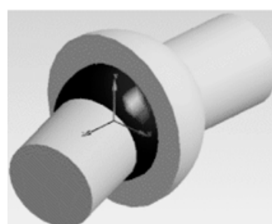
➢ Translational Joint——平动连接，限制 UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ，如图 16–3 所示。
➢ Slot Joint——狭槽连接，限制 UY，UZ，如图 16–4 所示。


图 16–3　平动连接

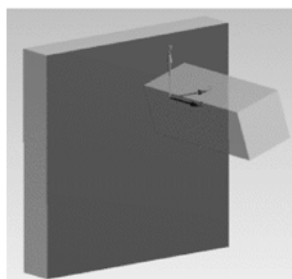

图 16–4　狭槽连接

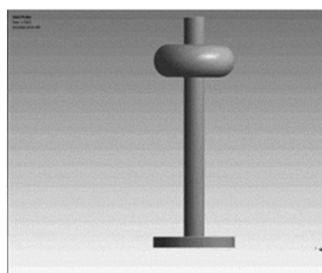
➢ Universal Joint——万向连接，限制 UX，UY，UZ，ROTY，如图 16–5 所示。
➢ Spherical Joint——球面连接，限制 UX，UY，UZ，如图 16–6 所示。


图 16–5　万向连接


图 16–6　球面连接

➢ Planar Joint——平面连接，限制 UZ，ROTX，ROTY，如图 16–7 所示。
➢ Bushing Joint——套管连接，不限制自由度，如图 16–8 所示。


图 16–7　平面连接


图 16–8　套管连接

➢ General Joint——通用连接，根据需要限制自由度。
➢ Point on Curve Joint——点面连接，限制 UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ。

16.2 刚体运动学示例

本节通过示例对使用 ANSYS Workbench 进行刚体运动学分析的操作流程进行说明。

16.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下），选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Rigid Dynamics”选项，在项目管理区创建分析项目 A，如图 16-9 所示。

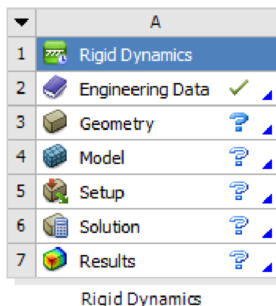


图 16-9 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本示例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap16”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry“，会进入到 DM 界面，查看模型如图 16-10 所示。此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4)，否则可直接进入步骤 5)。

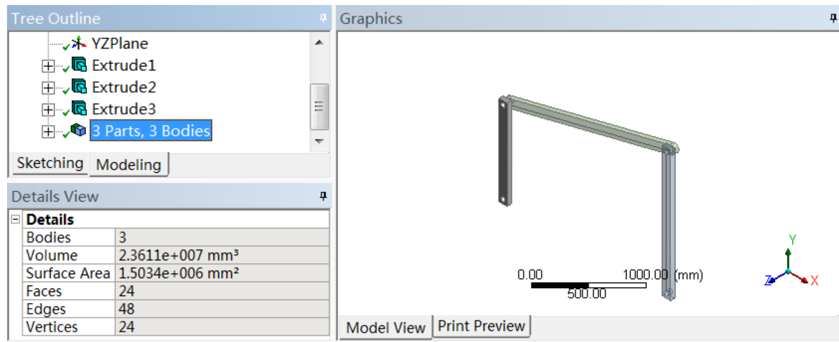


图 16-10 DM 模型界面

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操

作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，分析树结构图如图 16–11 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

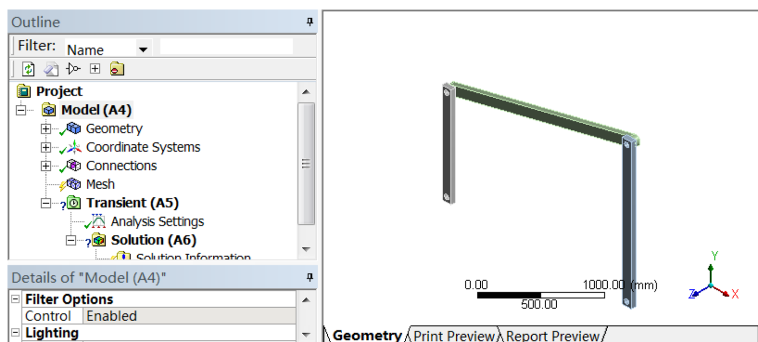


图 16–11　分析树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的所有“Solid”，在 Details of“Solid”中确保所有的 Solid 对象的“Stiffness Behavior”均为“Rigid”，如图 16–12 所示。

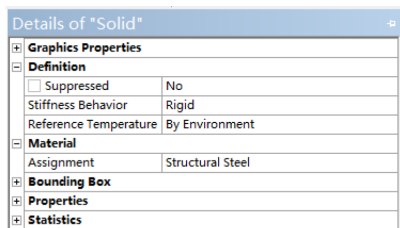


图 16–12　设置“Stiffness Behavior”均为“Rigid”

5. 设置连接

1）查看是否生成了 Contact（接触），如存在，则全部删除，如图 16–13 所示。

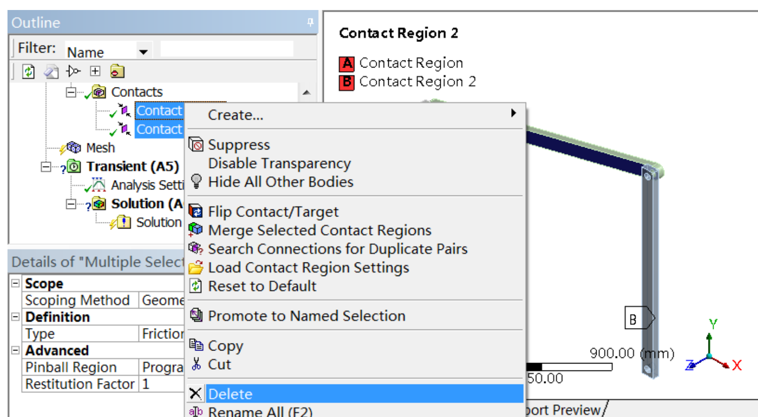


图 16–13　删除接触

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Connections”对象，然后在工具箱中选择“Body-Ground”→“Revolute”，此时树结构图中出现“Revolute”对象。

3）设置 Revolute 对象的细节窗口参数如图 16–14 所示，然后单击选择左边实体底部的孔，并在细节窗口的“Scope”中单击“Apply”按钮。

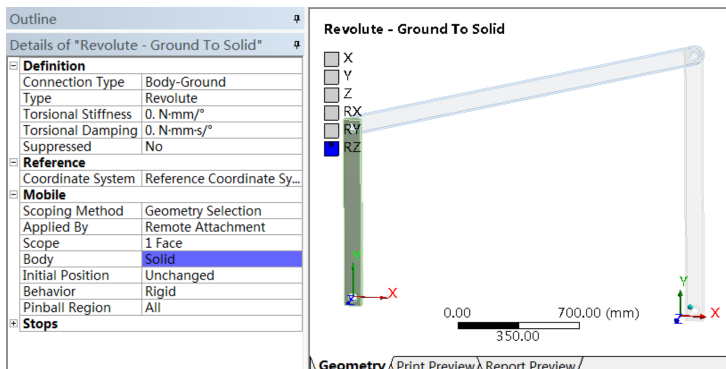


图 16-14　左臂对地旋转设置结果

4）按照上面的方法，继续添加 Revolute 对象。设置 Revolute 对象的细节窗口中参数如图 16-15 所示，然后单击选择右边实体底部的孔，并在细节窗口的“Scope”中单击“Apply”按钮。

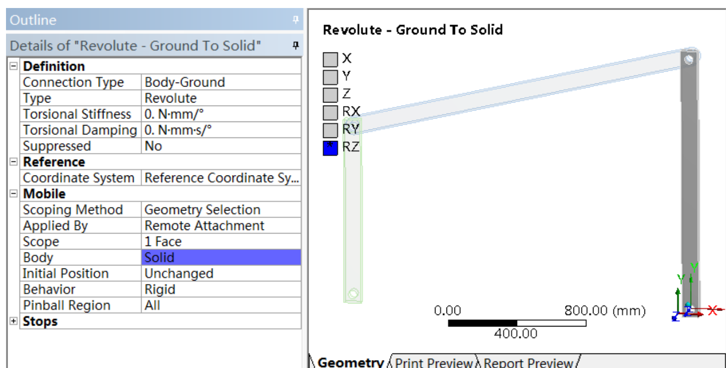


图 16-15　右臂对地旋转设置结果

5）按照上面的方法，继续添加 Revolute 对象。设置 Revolute 对象的细节窗口的参数如图 16-16 所示，然后单击选择左边实体上部的孔，并在细节窗口的“Reference”→“Scope”中单击“Apply”按钮。然后单击连杆对应的孔，并在细节窗口的“Reference”→“Scope”中单击“Apply”按钮。

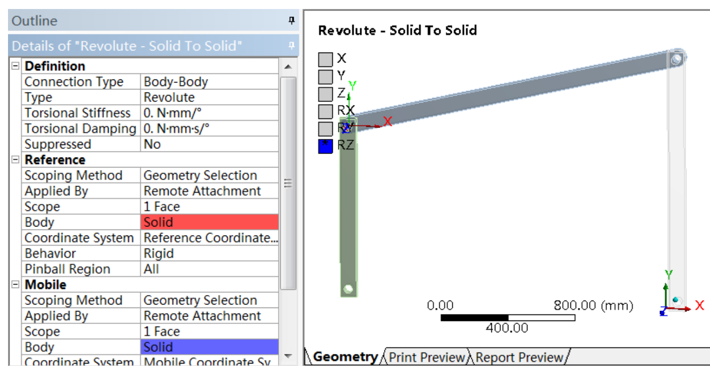


图 16-16　左臂与连杆连接结果

6）按照上面的方法，继续添加 Revolute 对象。设置 Revolute 对象的细节窗口中参数如图 16-17 所示，然后单击选择右边实体上部的孔，并在细节窗口中的“Reference”→“Scope”中单击“Apply”按钮。然后单击连杆对应的孔，并在细节窗口的“Reference”→“Scope”中单击“Apply”按钮。

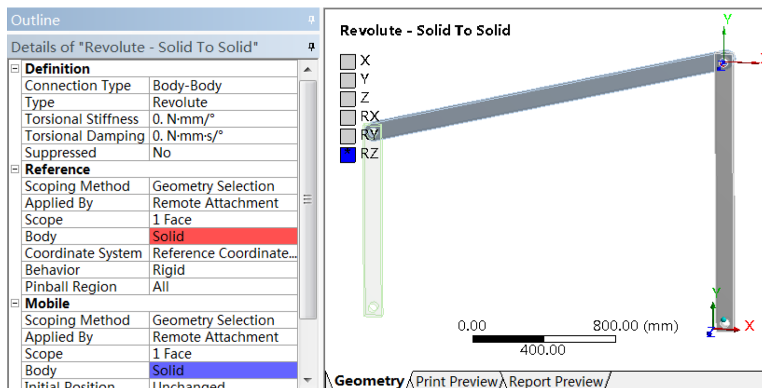


图 16-17 右臂与连杆连接结果

6. 设置初始条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Rigid Dynamics（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Joint Load”，此时在树结构图中会出现“Joint Load”对象。

3）设置 Joint Load 对象细节窗口参数，选择的连接为左臂对应的对地连接，设置结果如图 16-18 所示。

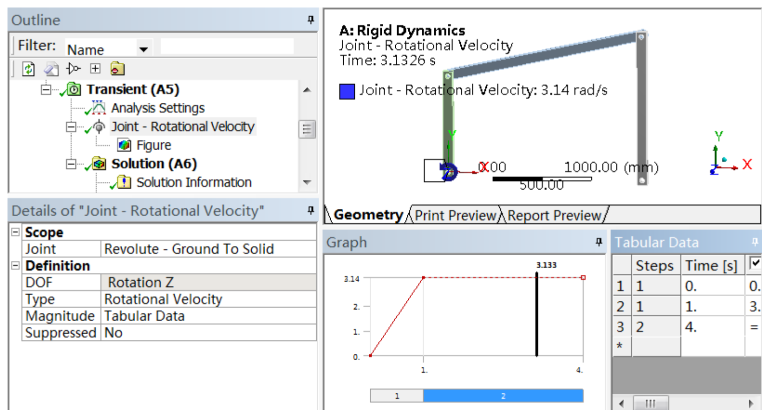


图 16-18 设置 Joint Load 对象

16.2.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Rigid Dynamics（A5）”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。



16.2.3 后处理

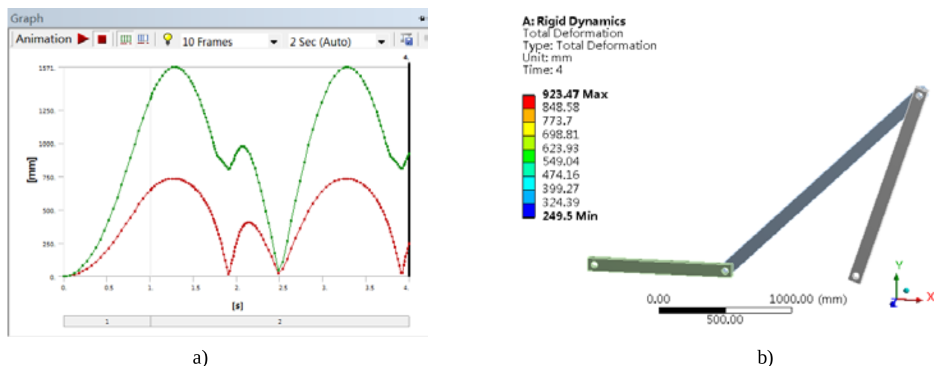
1. 查看整体响应

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体变形结果如图 16-19 所示。



a) b)

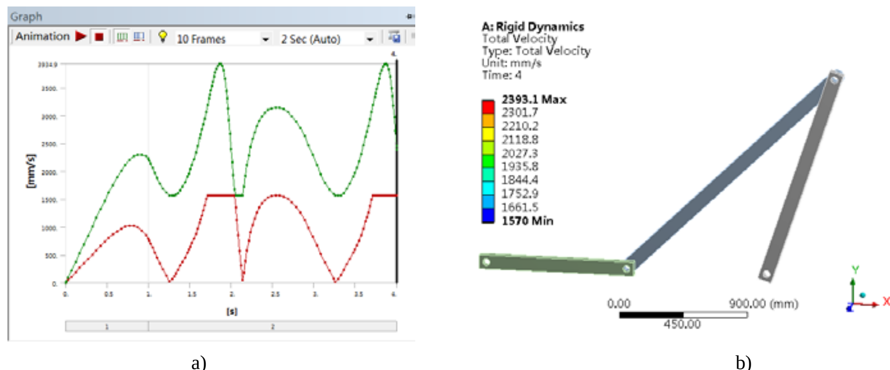
图 16-19 整体变形结果

a) 变形最大值和最小值时间历程曲线 b) 求解时间终点变形图

5）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total Velocity”，设置得到对象“Total Velocity”。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Velocity”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体速度图。

7）在 Outline 树结构图中的“Total Velocity”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体速度结果如图 16-20 所示。



a) b)

图 16-20 整体速度结果

a) 速度最大值和最小值时间历程曲线 b) 求解时间终点速度图

2. 查看变形时间历程结果

1）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation 2”选项。

2）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation 2”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形图。设置细节窗口中内容见表 16-1。

表 16-1　设置变形结果参数

	Total Deformation 2	Total Deformation 3	Total Deformation 4	Total Deformation 5
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection
Geometry	All Bodies	All Bodies	All Bodies	All Bodies
Type	Total Deformation	Total Deformation2	Total Deformation3	Total Deformation
By	Time	Time	Time	Time
Display Time	0.5s	1.5s	2.5s	3.0s

3）按步骤 1）～2）的方式继续添加 Total Deformation 3～5，并设置细节窗口中内容，见表 16-1。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation 2”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的图形如图 16-21 所示。

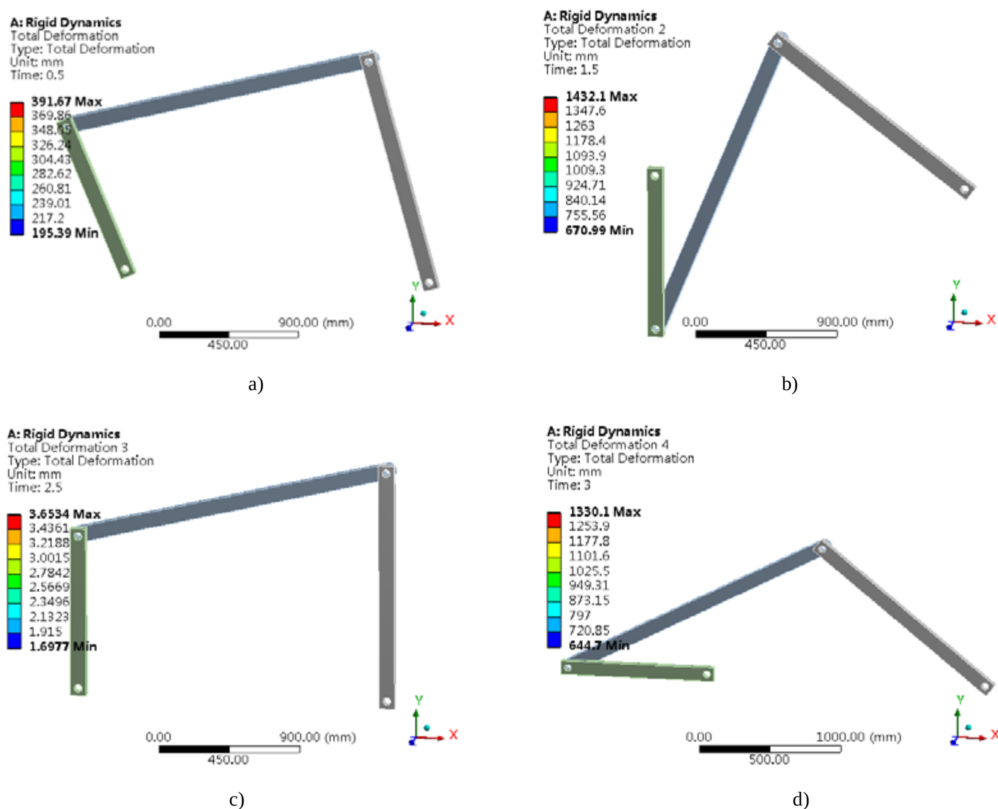


图 16-21　查看变形历程

a) 0.75s　b) 1.25s　c) 1.75s　d) 2.25s

3. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 16-22 所示。

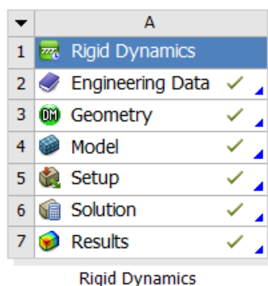


图 16-22　完成分析的项目工程图

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

16.3　本章小结

本章介绍了使用 ANSYS Workbench 进行刚体运动学分析的操作过程。相对于其他 CAD 分析软件，ANSYS Workbench 将刚体运动学集成到有限元分析中，可以更好地开展后续分析。本章仅作为刚体运动学分析的入门，如有需要请参考帮助文档和有关书籍。

第17章 垫片分析

垫片密封是一种常见的密封方式，其在压力容器场合有着极其重要的应用。为了保证器械的使用性能，同时减少试验的次数和研发的成本，可以使用 ANSYS Workbench 对垫片的性能进行仿真。本章将介绍 ANSYS Workbench 垫片分析的实现方法。

学习目标：

➢ 理解进行垫片分析的步骤。

➢ 练习使用 ANSYS Workbench 进行垫片分析。

17.1 垫片分析过程

17.1.1 垫片分析概述

密封理论认为，法兰-垫片结构必须在安装时将垫片预紧到一定载荷，当操作时，垫片上必须保持足够的最低载荷才能保证密封。垫片的密封特性曲线如图 17-1 所示，在密封时，垫片承受压强在漏点对应压强以上，否则发生泄漏。

从力学上看，垫片在两个结构件之间传递压力，因而自身承受巨大的压紧力。垫片虽然可以像结构件一样使用钢等材料，但其在压应力作用下表现出了高度的非线性和复杂的卸载表现。另外，其横向剪切力很小，在分析中一般忽略。

垫片作为密封元件，当垫片的收缩量小于一定值时，垫片上将没有压力作用，而当垫片承受拉力时，密封将失效，因此垫片通常不会承受拉应力。

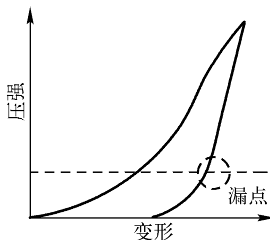


图 17-1 垫片密封特性曲线

17.1.2 垫片分析流程

垫片分析的流程与静力分析的流程一致，具体如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接，包括接触。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

但需要注意：

1）在结构中进行垫片分析首先需要定义垫片材料。

2）在进行分析前，需要将垫片所在的体设置为 Gasket。

3）在求解完成后，必须使用专门的命令从垫片单元中获取结果。

17.2 垫片分析示例

本节通过示例对垫片分析的过程进行说明。

17.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 17-2 所示。

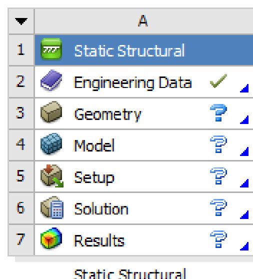


图 17-2 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入如图 17-3 所示的工程数据界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

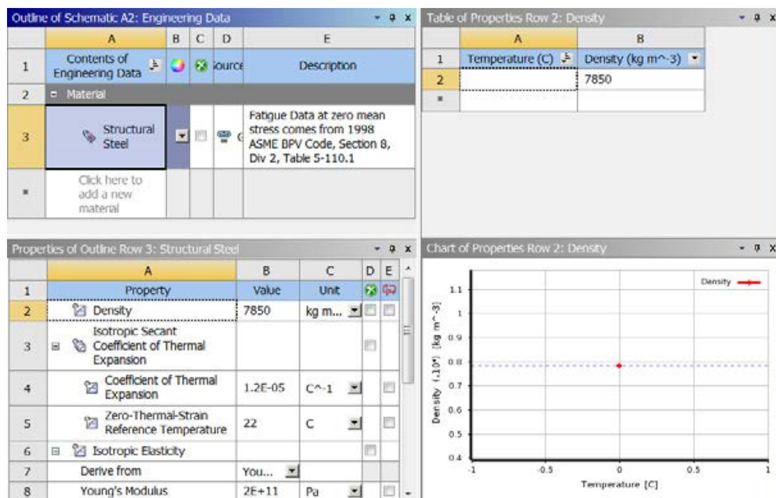


图 17-3 工程数据界面

2）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，此时原界面窗口中的 Outline of Schematic A2:Engineering Data 消失，Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 窗口出现，如图 17-4 所示。

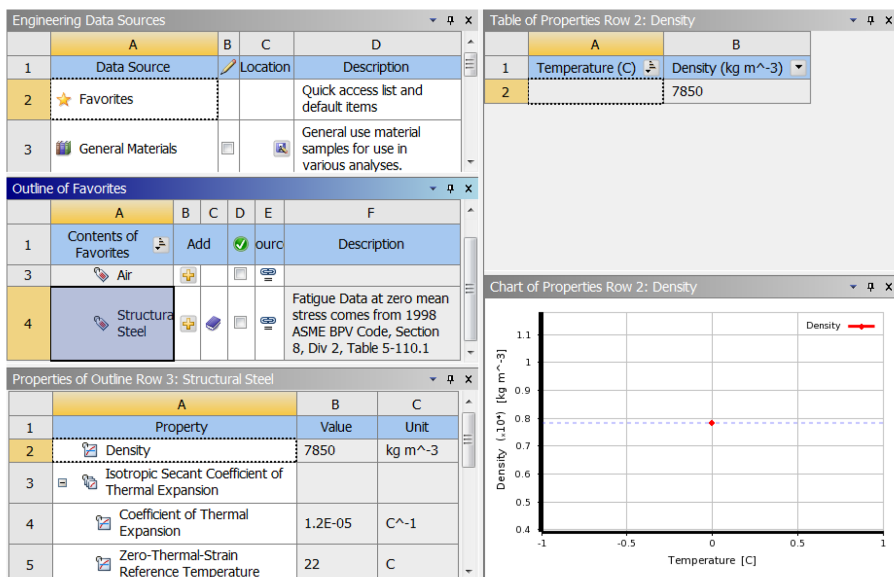


图 17-4　工程数据库界面

3）单击 Engineering Data Sources 窗口中的“General Non-linear Materials”，此时 Outline 窗口显示为 Outline of General Non-linear Materials。

4）在 Outline of General Non-linear Materials 窗口中，选择“Gasket NonLinear Unloading”，然后单击后面的添加符号，如图 17-5 所示。

Outline of General Non-linear Materials

	A	B	C	D	E
1	Contents of General Non-linear Materials	Add		Source	Description
4	Concrete NL			Gen	
5	Copper Alloy NL			Gen	
6	Gasket Linear Unloading			Gen	
7	Gasket Non Linear Unloading			Gen	
8	Magnesium Alloy NL			Gen	
9	Stainless Steel NL			Gen	
10	Structural Steel NL			Gen	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
11	Titanium Alloy NL			Gen	

图 17-5　添加非线性卸载垫片材料

5）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，返回到初始界面中，此时 Outline of Schematic A2 中显示添加的“Gasket Non Linear Unloading”，如图 17-6 所示。

6）单击选择“Gasket Non Linear Unloading”，查看其材料属性，可看到材料模型曲线。

7）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料添加完毕。添加的材料

的加载和卸载曲线如图 17-7 所示。

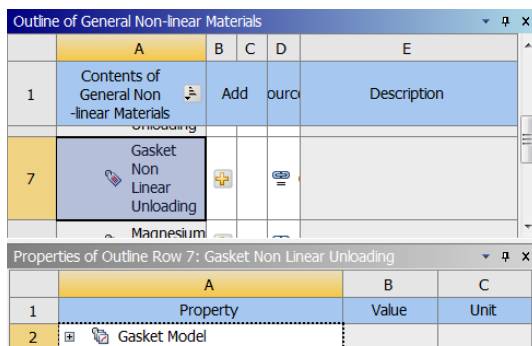


图 17-6　已添加非线性卸载垫片材料

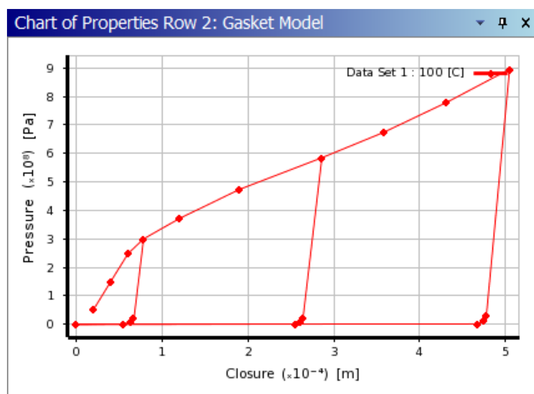


图 17-7　非线性加载和卸载曲线

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap17”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面，查看模型如图 17-8 所示，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

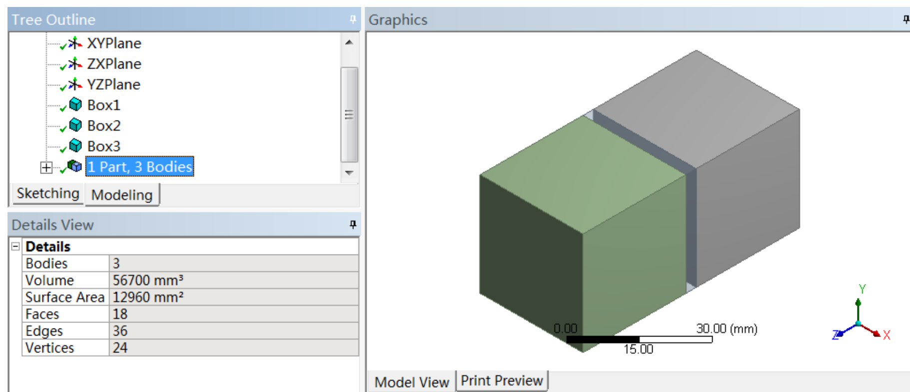


图 17-8　DM 模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，分析项目树结构图如图 17-9 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。导入的模型中间部分为仿真垫片材料。

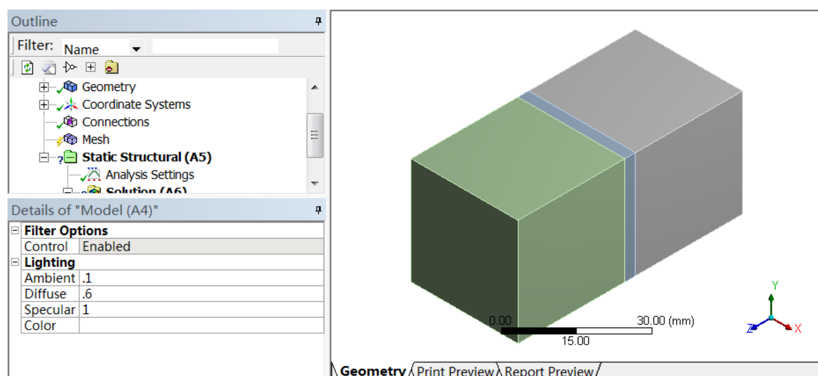


图 17-9　分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 1 个“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择“Gasket Non Linear Unloading”即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。然后将“Stiffness Behavior”设置为“Gasket”，如图 17-10 所示。

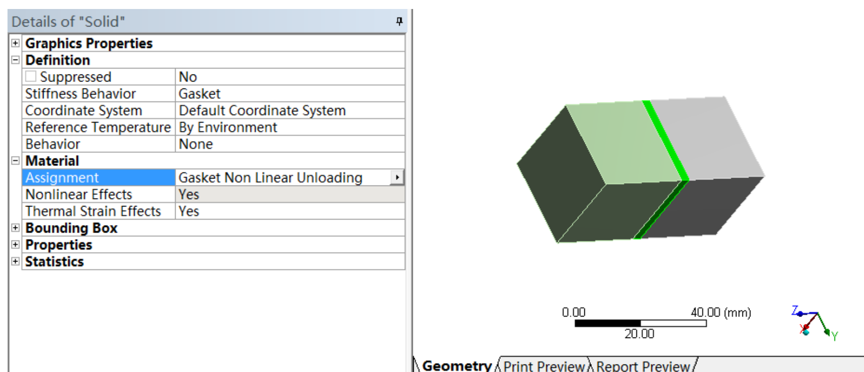


图 17-10　设置垫片材料和垫片行为

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 17-11 所示。

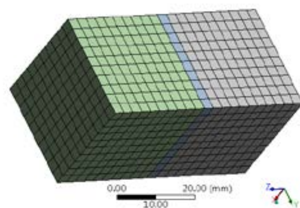


图 17-11　网格划分效果

6. 设置求解选项

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Analysis Settings”项，设置细节窗口和表格参数，如图 17-12 和图 17-13 所示。

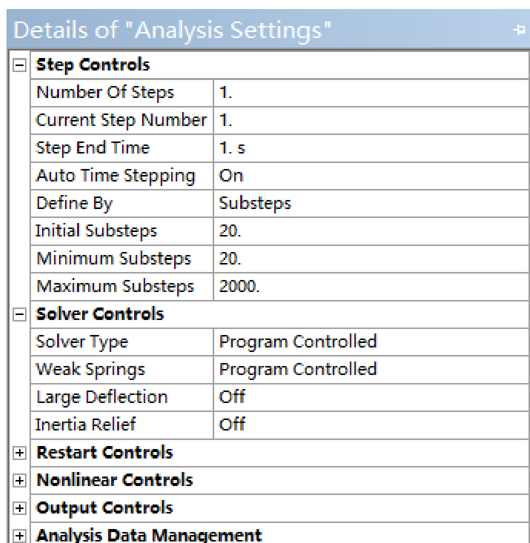


图 17-12　分析选项载荷步 1 设置

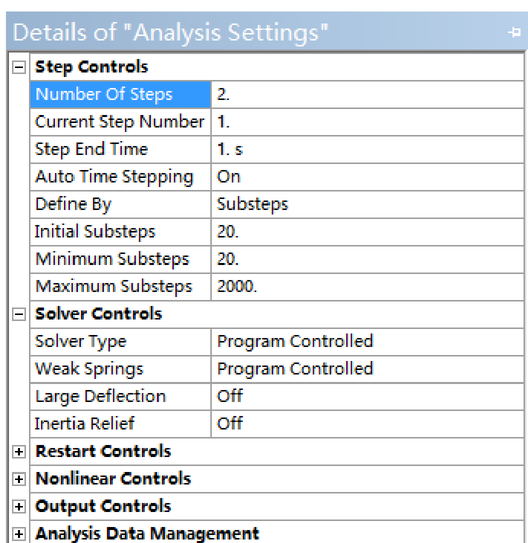


图 17-13　分析选项载荷步 2 设置

7. 设置边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Displacement”对象。

3）选中“Displacement”，选择 *x* 坐标为 0 的面，然后在细节窗口的“Geometry”中单击“Apply”按钮，并设置其细节窗口参数，见表 17-1。

表 17-1　边界条件设置表

	Displacement	Displacement 2	Displacement 3	Displacement 4
Scoping Method	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection	Geometry Selection
Geometry	3 Faces	3 Faces	1 Face	1 Face
Type	Displacement	Displacement	Displacement	Displacement
Define By	Components	Components	Components	Components
Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0mm(ramped)	Free	Free	Free
Y Component	Free	0mm(ramped)	Free	Free
Z Component	Free	Free	0mm(ramped)	Tabular Data

4）添加 Displacement 2，选择 *y* 坐标为 0 的面，然后在细节窗口的“Geometry”中单击“Apply”按钮，并设置细节窗口参数，见表 17-1。

5）添加 Displacement 3，选择 *z* 坐标为 0 的面，然后在细节窗口的“Geometry”中单击“Apply”按钮，并设置其细节窗口参数，见如表 17-1。

6）添加 Displacement 4，选择 *z* 坐标为 30 的面，然后在细节窗口的“Geometry”中

单击“Apply”按钮，并设置其细节窗口参数，见表 17-1，其载荷表格数据设置如图 17-14 所示。

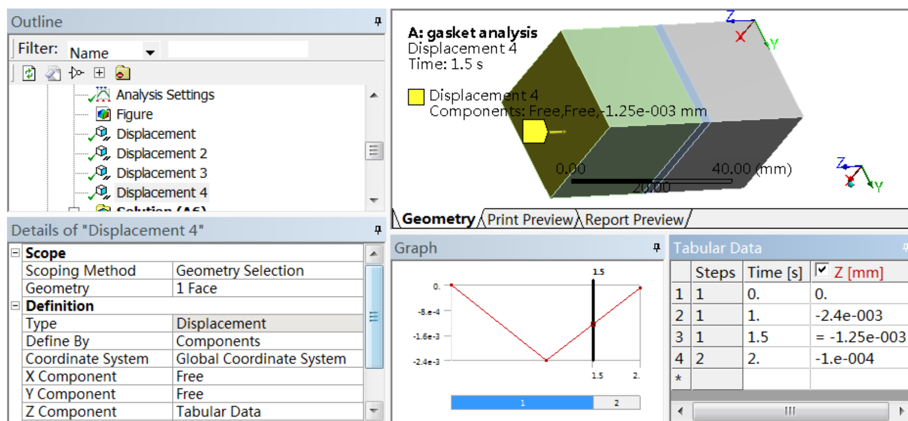


图 17-14 Displacement4 数据设置

7）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，查看边界条件示意图，如图 17-15 所示。

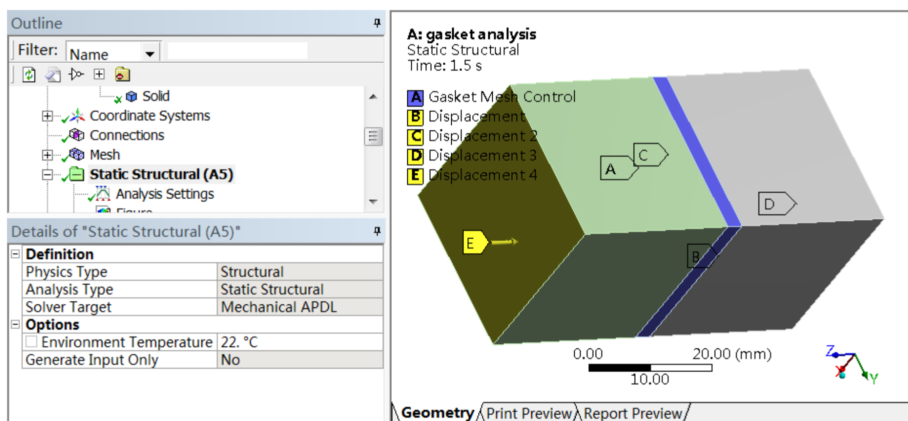


图 17-15 边界条件示意图

17.2.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

17.2.3 后处理

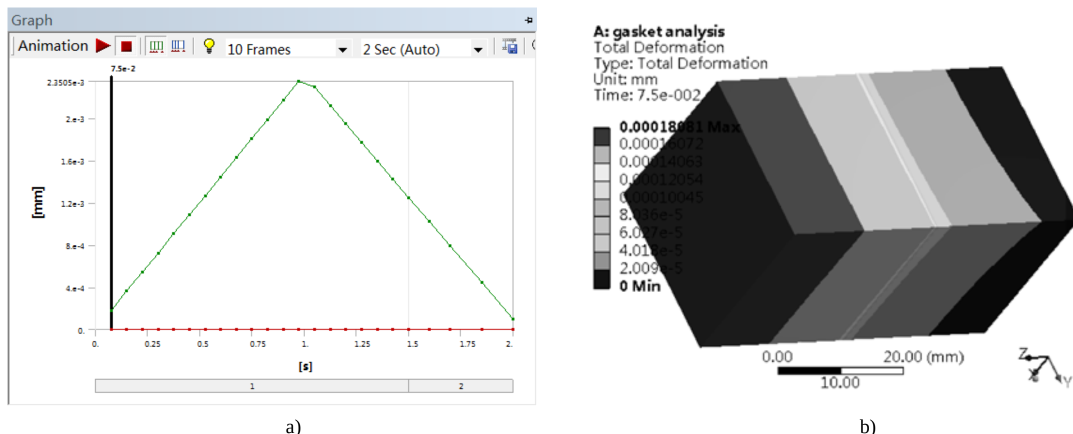
1. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体变形结果如图 17-16 所示。



a) b)

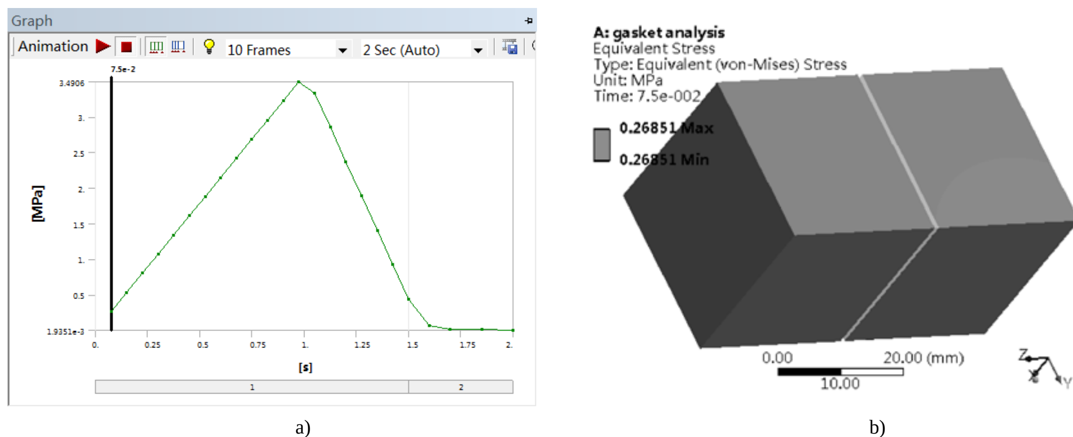
图 17-16 整体变形结果

a) 整体变形云图 b) 整体变形云图

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力结果如图 17-17 所示。



a) b)

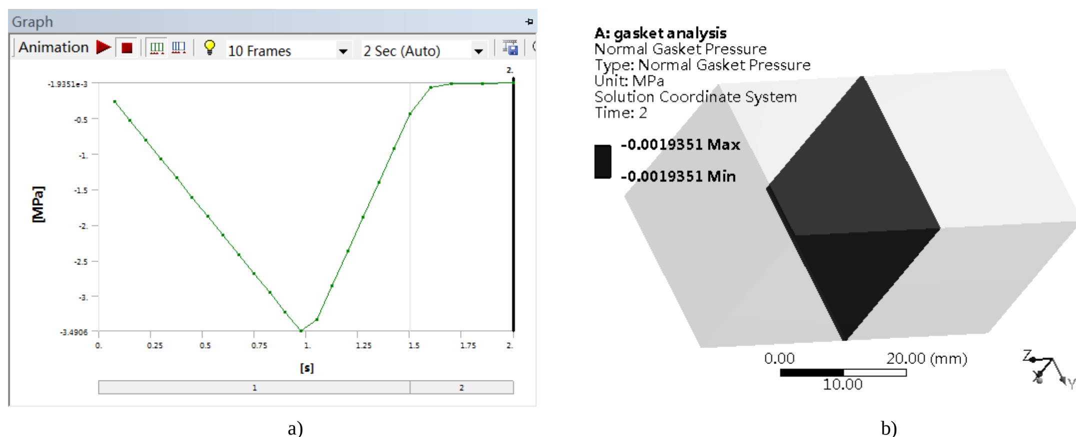
图 17-17 等效应力结果

a) 应力最大值和最小值时间历程曲线 b) 等效应力云图

8）选择 Solution 工具栏中的“Gasket”→“Normal Gasket Pressure”，此时在树结构图中会出现“Normal Gasket Pressure”选项。

9）选择 Solution 工具栏中的“Gasket”→“Normal Gasket Total Closure”，此时在树结构图中会出现“Normal Gasket Total Closure”选项。

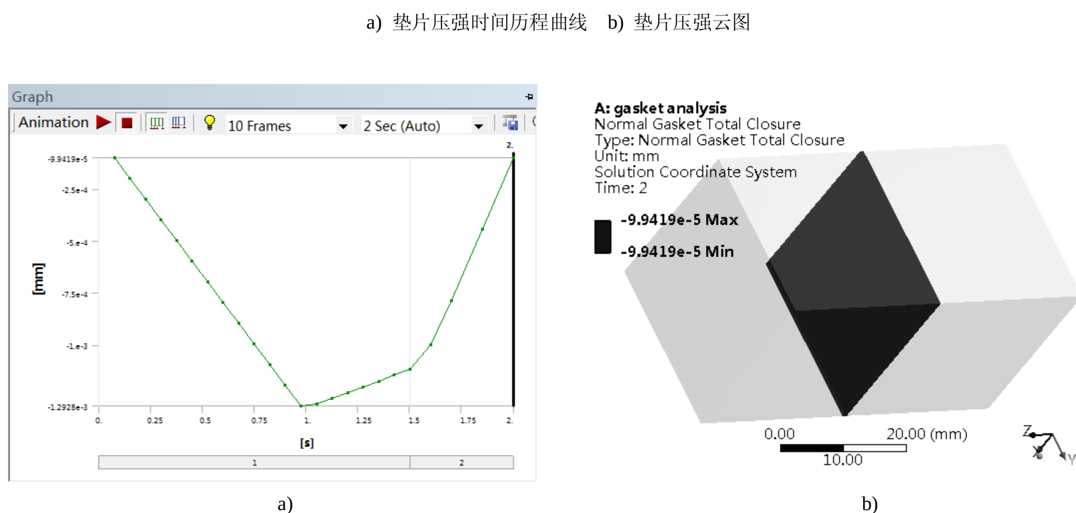
10）在 Outline 树结构图中的“Normal Gasket Total Closure”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的垫片压强结果和垫片压缩结果分别如图 17-18 和图 17-19 所示。



a) b)

图 17-18 垫片压强结果

a) 垫片压强时间历程曲线 b) 垫片压强云图



a) b)

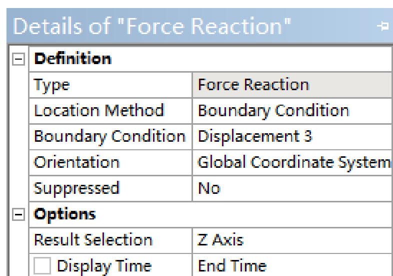
图 17-19 垫片压缩结果

a) 垫片压缩时间历程曲线 b) 垫片压缩云图

11）选择 Solution 工具栏中的“Probe”→“Force Reaction”，此时在树结构图中会出现“Force Reaction”对象。

12）设置 Force Reaction 对象的细节窗口参数如图 17-20 所示。

13）在 Outline 树结构图中的“Force Reaction”对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的反力时间历程曲线如图 17-21 所示。



Details of "Force Reaction"

Definition	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Displacement 3
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
Options	
Result Selection	Z Axis
Display Time	End Time

图 17-20　Force Reaction 对象的细节设置

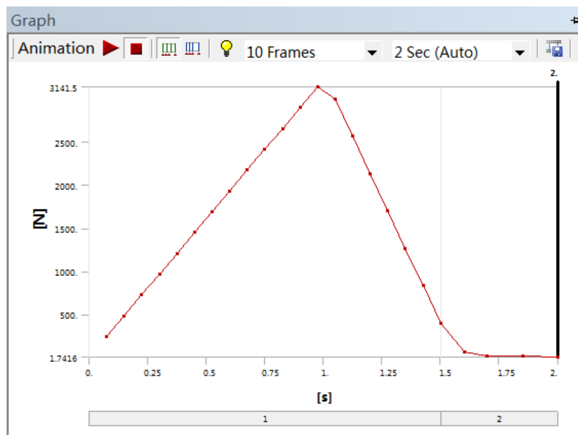
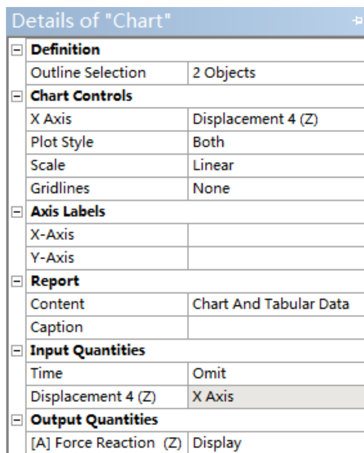


图 17-21　反力时间历程曲线

14）选择 Solution，在工具栏中单击“New Chartand Table”按钮，此时在 Outline 树结构图中出现“Chart”对象。

15）在树结构图中选择“Total Deformation”和“Force Reaction”，在“Outline Selection”后单击“Apply”按钮，并设置 Chart 对象的细节表参数如图 17-22 所示，得到的位移-反力曲线如图 17-23 所示。



Details of "Chart"

Definition	
Outline Selection	2 Objects
Chart Controls	
X Axis	Displacement 4 (Z)
Plot Style	Both
Scale	Linear
Gridlines	None
Axis Labels	
X-Axis	
Y-Axis	
Report	
Content	Chart And Tabular Data
Caption	
Input Quantities	
Time	Omit
Displacement 4 (Z)	X Axis
Output Quantities	
[A] Force Reaction (Z)	Display

图 17-22　设置 Chart 对象细节

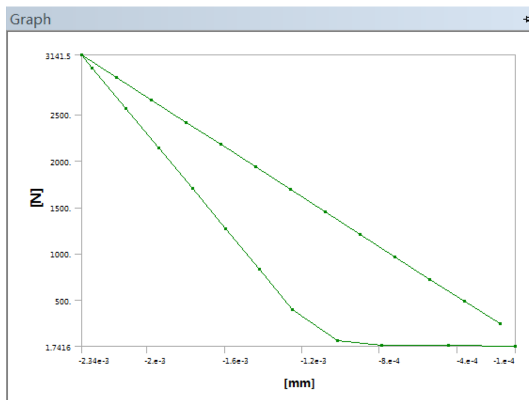


图 17-23　位移-反力曲线

16）选择 Solution，在工具栏中单击“New Chartand Table”按钮，此时在 Outline 树结构图中出现“Chart 2”对象。

17）在树结构图中选择“Normal Gasket Pressure”和“Normal Gasket Total Closure”，在“Outline Selection”后单击“Apply”按钮，并设置 Chart 2 对象的细节表参数如图 17-24 所示，得到的压强-闭合曲线如图 17-25 所示。

Details of "Chart 2"

Definition	
Outline Selection	2 Objects
Chart Controls	
X Axis	Normal Gasket Total Closure (Min)
Plot Style	Both
Scale	Linear
Gridlines	None
Axis Labels	
X-Axis	closure
Y-Axis	pressure
Report	
Content	Chart And Tabular Data
Caption	
Input Quantities	
Time	Omit
Output Quantities	
[A] Normal Gasket Pressure (Min)	Omit
[B] Normal Gasket Pressure (Max)	Display
Normal Gasket Total Closure (Min)	X Axis
[C] Normal Gasket Total Closure (Max)	Omit

图 17-24 设置 Chart 2 对象细节

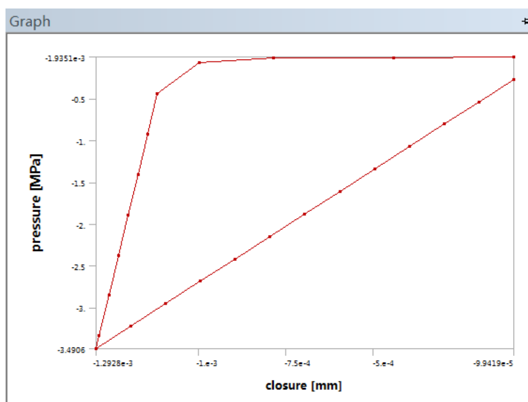


图 17-25 压强-闭合曲线

2. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 17-26 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

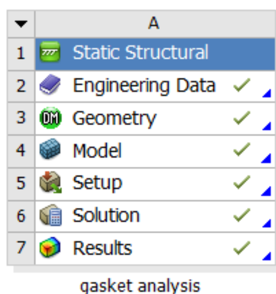


图 17-26 完成分析的项目工程图

17.3 本章小结

本章介绍了在 ANSYS Workbench 中对垫片类材料进行分析的相关内容。密封在压力载荷条件下有着重要的作用，然而试验成本高昂，使用本章介绍的垫片分析相关内容，有助于降低试验成本，改善密封性能。

第 18 章　疲 劳 分 析

疲劳是指结构在反复作用的交变应力作用下，即使所承受的应力小于其许用应力，但仍然出现断裂的现象。在转动部件和承受振动载荷的结构中，疲劳是常见的破坏方式。设计人员在设计相应的结构时，必须进行疲劳设计。ANSYS Workbench 提供的疲劳分析功能，将有助于得到合理的疲劳强度设计参数。本章将介绍疲劳分析在 ANSYS Workbench 中的实现方式。

学习目标：

➢ 理解进行疲劳分析的步骤。

➢ 练习使用 ANSYS Workbench 进行疲劳分析。

18.1　疲劳分析过程

18.1.1　概述

图 18-1a 所示为周期循环载荷，图 18-1b 所示为应力-循环次数曲线，两图为疲劳分析的根据。更详细地说，疲劳分析中主要考虑的因素包括：

1）载荷循环次数。

2）应力值范围。

3）应力平均水平。

4）应力集中现象。

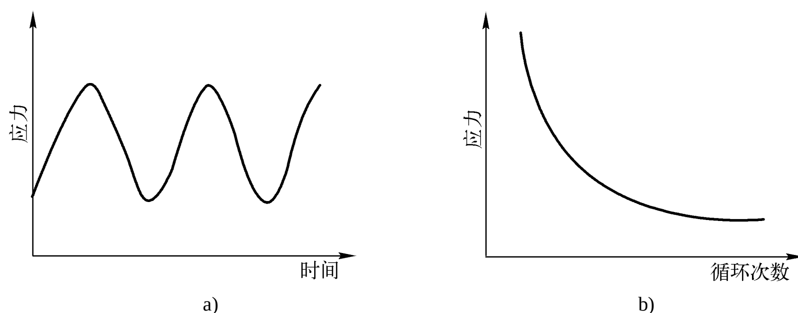


图 18-1　疲劳相关曲线

a) 周期循环载荷 b) 应力-循环次数曲线

在 ANSYS 中可以进行的疲劳计算包括：

1）可以对所有实体单元或壳单元模型，使用现有的应力结果求取疲劳使用系数。也可以手动输入线单元模型应力数据，求取疲劳使用系数。

2）可以在选中的位置预定循环次数和疲劳载荷，并保存应力结果。

3）可以在选中的位置定义应力集中系数和缩放因子系数。

18.1.2 疲劳分析流程

疲劳分析的基本流程如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）定义并求解疲劳分析。

13）保存并退出。

需要注意的事项包括：

1）在几何方面，疲劳计算只支持体和面，线模型目前还不能输出应力结果，所以疲劳计算对于线是忽略的，线仍然可以包括在模型中以给结构提供刚性，但在疲劳分析中并不计算线模型。

2）由于有线性静力分析，所以需要用到弹性模量和泊松比。如果有惯性载荷，则需要输入质量密度；如果有热载荷，则需要输入热膨胀系数和热导率；如果使用应力工具结果（Stress Tool Result），那么就需要输入应力极限数据，而且这个数据也适用于平均应力修正理论疲劳分析。

3）疲劳模块也需要使用到工程数据分支下的材料特性中的 S–N 曲线数据：数据类型在"疲劳特性"（Fatigue Properties）选项下说明。S–N 曲线数据是在材料特性分支下的"交变应力与循环"（Alternating Stress vs. Cycles）选项中输入的。

4）如果 S–N 曲线材料数据可用于不同的平均应力或应力比的情况下，那么多重 S–N 曲线也可以输入到程序中。

5）在疲劳计算被详细地定义以后，疲劳结果可在 Fatigue Tool 下指定。等值线结果（Contour）包括寿命（Lifes）、损伤（Damage）、安全系数（Safety Factor）、双轴指示（Biaxiality Indication），以及等效交变应力（Equivalent Alternating Stress）。曲线图结果（Graphresults）仅包含对于恒定振幅分析的疲劳敏感性（Fatigue Sensitivity）。这些结果的分析将只做简短讨论。

18.1.3 查看疲劳分析结果

对于恒定振幅和比例载荷情况，有多种类型的疲劳结果供选择：

- 寿命（Life）：等值线显示由于疲劳作用直到失效的循环次数，如果交变应力比 S-N 曲线中定义的最低交变应力低，则使用该寿命（循环次数）。
- 损伤（Damage）：设计寿命与可用寿命的比值，设计寿命在细节栏（Details view）中定义。
- 安全系数（Safety Factor）：安全系数等值线是关于一个在给定设计寿命下的失效，设计寿命值在细节栏（Details view）输入，给定最大安全系数 SF 值是 15。
- 双轴指示（Biaxiality Indication）：应力双轴等值线有助于确定局部的应力状态，双轴指示是较小与较大主应力的比值（对于主应力接近 0 的可以忽略）。因此，单轴应力局部区域 B 值为 0，纯剪切的为−1，双轴的为 1。
- 等效交变应力（Equivalent Alternating Stress）：等值线在模型上绘出了部件的等效交变应力，它是基于所选择的应力类型，在考虑了载荷类型和平均应力影响后，用于查询 S-N 曲线的应力。
- 疲劳敏感性（Fatigue Sensitivity）：疲劳敏感曲线图能显示出部件的寿命、损伤或安全系数在临界区域随载荷的变化而变化，能够输入载荷变化的极限（包括负比率）。

任何疲劳选项的范围可以是选定的零件或零件的表面，收敛性可用于等值线结果。收敛和警告对疲劳敏感性图是无效的，因为这些图提供关于载荷的敏感性（如没有为了收敛目的而指定的标量选项）。

疲劳工具可以与求解组合一起使用，在求解组合中，多重环境可能被组合。疲劳计算将基于不同环境的线性组合的结果。

18.2 疲劳分析示例

本节通过示例对疲劳分析过程进行讲解。

18.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，在项目管理区创建分析项目 A，如图 18-2 所示。

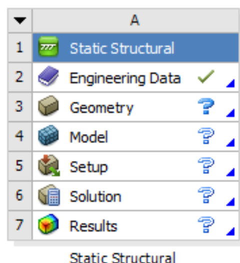


图 18-2 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 2:

Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap18”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面，查看模型如图 18-3 所示。此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

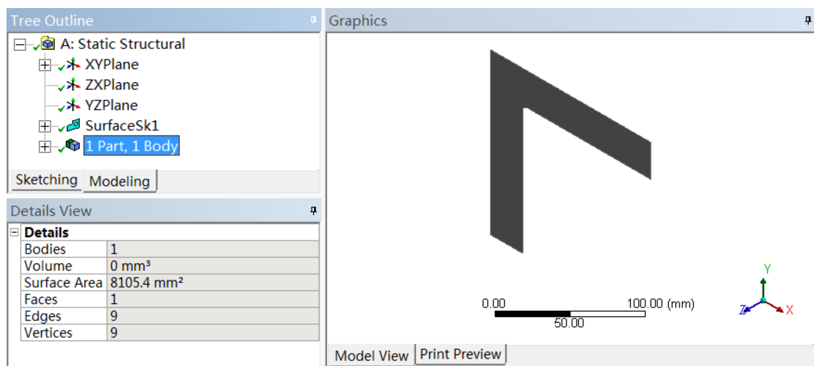


图 18-3　DM 模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，查看分析项目树结构图，如图 18-4 所示。在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

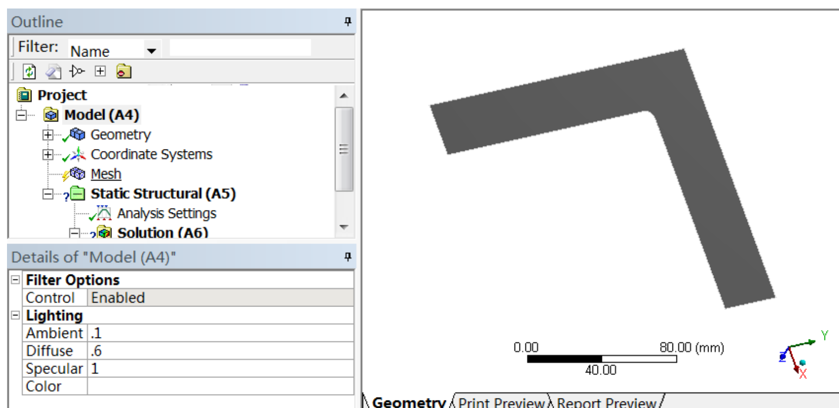


图 18-4　分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Surface Body”，此时即可在 Details of“Surface Body”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✔，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

4）在 Details of“Surface Body”细节窗口中设置“Thickness”为“50mm”，设置面实体的厚度为 50mm，如图 18-5 所示。

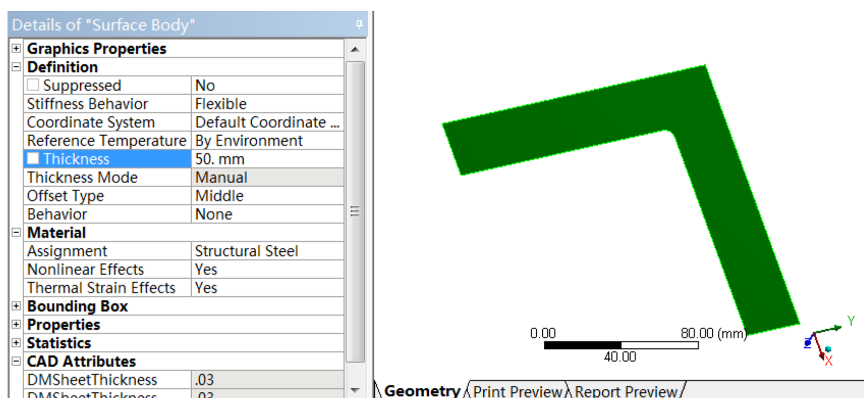


图 18-5　零件行为设置

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上右击，选择“Insert”→“Sizing”，然后选择圆角所在边缘，在细节窗口中的“Geometry”下单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为 1mm，如图 18-6 所示。

3）在“Mesh”上右击，选择“Insert”→“Method”，然后选择待划分的面体，在细节窗口中的“Geometry”下单击“Apply”按钮，并设置细节窗口中的“Method”为“MultiZone Quad/Tri”，如图 18-7 所示。

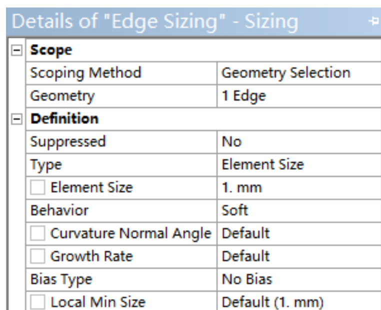


图 18-6　设置划分尺寸

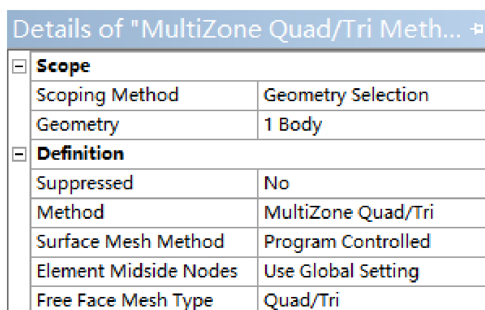


图 18-7　设置划分方法

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate

Mesh”，生成网格最终的效果如图 18-8 所示。

6. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

图 18-8 网格划分效果

3）选中“Fixed Support”，选择底边，单击 Details of“Fixed Support”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束。

4）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

5）选中“Force”，选择需要施加力的支撑端边缘，单击 Details of“Force”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置力载荷如图 18-9 所示。然后单击 *Y* 轴正向，并在 Direction 中单击“Apply”按钮，该设置施加了 *Y* 向大小为“2650N”的力，如图 18-9 所示。

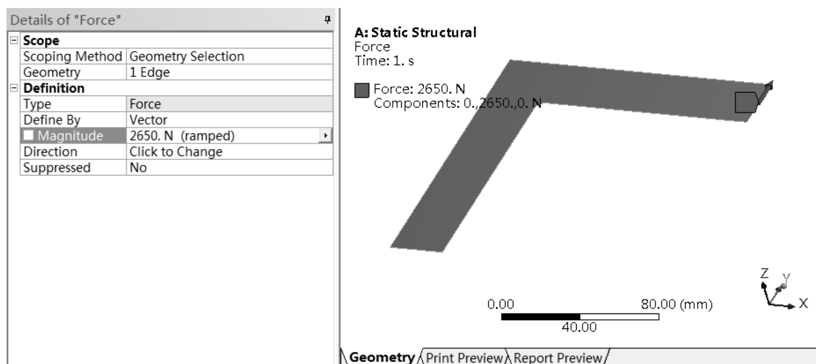


图 18-9 设置力载荷

6）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，查看边界条件示意图，如图 18-10 所示。

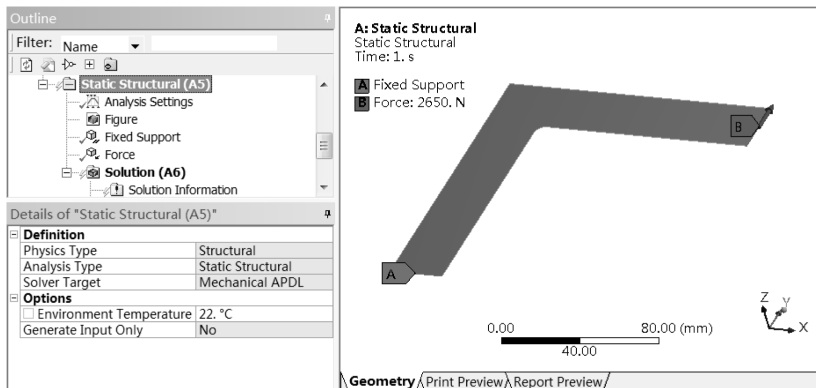


图 18-10 边界条件示意图

18.2.2 静力分析

1. 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

2. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体变形云图如图 18-11 所示。

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力云图如图 18-12 所示。

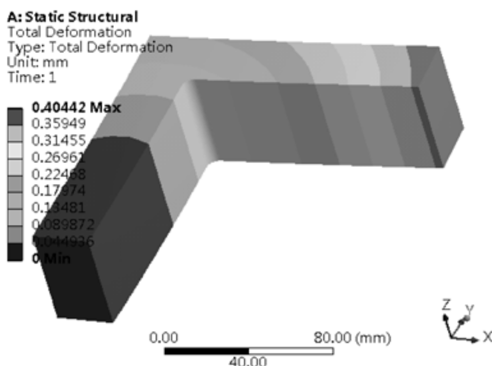


图 18-11 整体变形云图

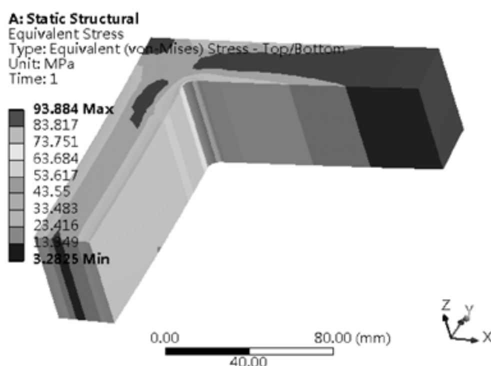


图 18-12 等效应力云图

18.2.3 疲劳分析

1. 查看结果

1）选择 Solution 工具栏中的“Tools”→“Fatigue Tool”，此时在树结构图中 Solution 下将出现“Fatigue Tool”对象。

2）单击“Fatigue Tool”对象，设置细节窗口参数如图 18-13 所示，得到的 Fatigue Tool 对象设置结果如图 18-14 所示。

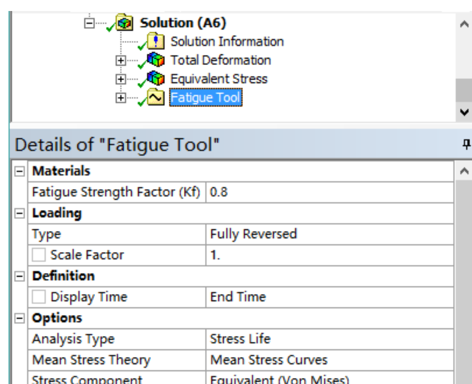


图 18-13 Fatigue Tool 对象细节设置

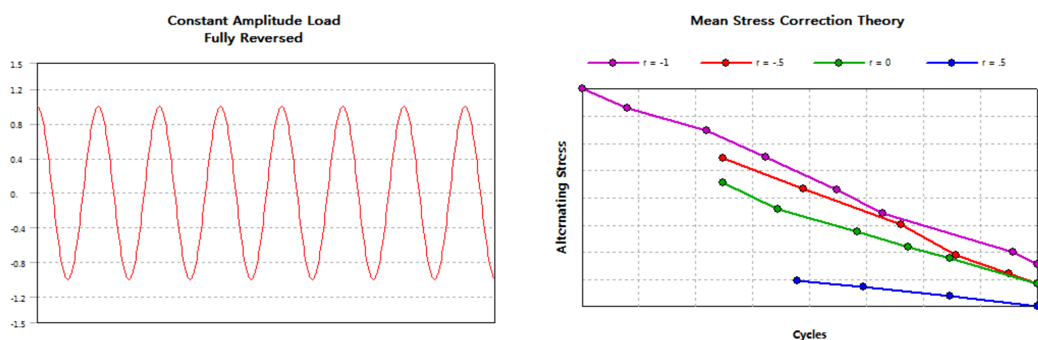


图 18-14 Fatigue Tool 对象设置结果

3）右击“Fatigue Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Life”。

4）右击“Life”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的疲劳寿命云图如图 18-15 所示。

5）右击“Fatigue Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Safety Factor”。

6）右击“Safety Factor”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的疲劳安全系数云图如图 18-16 所示。

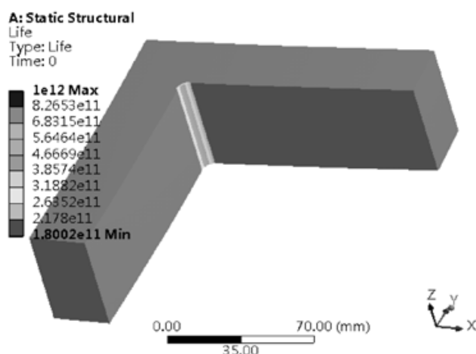


图 18-15 疲劳寿命云图

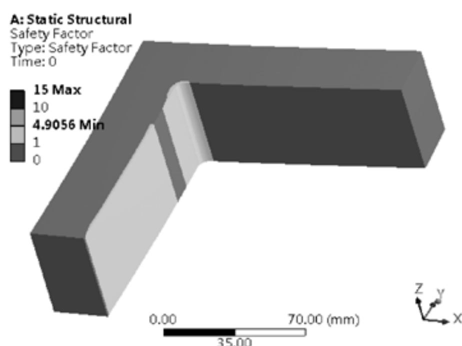


图 18-16 疲劳安全系数云图

7）右击“Fatigue Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Damage”。

8）右击“Damage”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的疲劳损伤云图如图 18-17 所示。

9）右击“Fatigue Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Equivalent Alternating Stress”。

10）右击“Equivalent Alternating Stress”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效交变应力云图如图 18-18 所示。

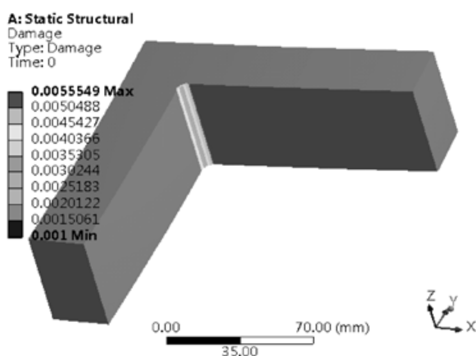


图 18-17　疲劳损伤云图

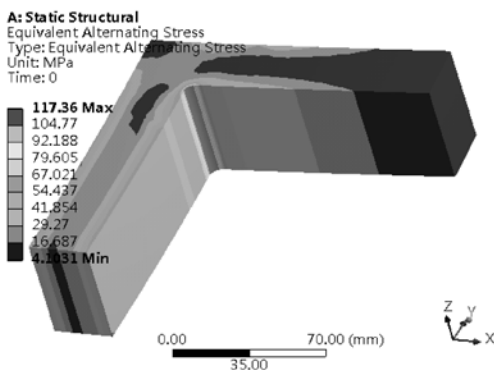


图 18-18　等效交变应力云图

2. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 18-19 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

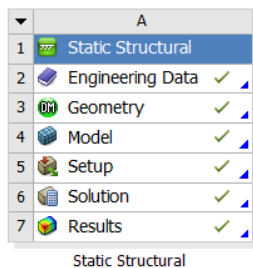


图 18-19　完成的分析项目

18.3　本章小结

本章介绍了疲劳分析在 ANSYS Workbench 中的实现方法。在 ANSYS Workbench 中，疲劳计算在求解结果步骤中进行，基本的操作步骤包括定义疲劳载荷相关参数、设置时间循环次数、疲劳计算和查看结果等，过程相对简单，但需要注意正确定义疲劳参数。

第 19 章　断 裂 分 析

裂纹和缺陷在结构和零件中广泛存在，严重地破坏了结构的整体一致性。在工程中，有时需要考虑由于裂纹和缺陷导致的结构断裂现象。设计人员可以使用 ANSYS 中提供的断裂分析方法分析结构断裂现象。本章将介绍使用 ANSYS 进行断裂力学分析的方法。

学习目标：

- 理解进行断裂分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行断裂分析。

19.1　断裂分析过程

在传统的设计中，通常使用材料强度理论设计零件。然而基于材料强度的方法，无法对结构中存在的裂缝引起的应力集中现象进行分析，而存在裂缝的区域却常为零件中最为薄弱的区域。有时，裂纹发生扩展会很快使零件失效，甚至引起灾难性事故。

断裂力学考虑了结构中存在的裂纹与瑕疵，以裂纹的尺寸为重要的变量，并使用断裂韧性取代材料强度为材料参数对结构进行设计。

断裂分析使用能量准则或应力集中系数准则来模拟裂纹扩展的情况。使用能量准则时，裂纹在单位尺寸上生长需要的能量反映了断裂韧性的大小。当使用应力集中系数准则时，应力的幅值和变形区域刻画了断裂韧性。在一些情况下，两种准则是等效的。

19.1.1　断裂模式

断裂包括 3 种基本形式，具体如下。

- 模式Ⅰ——拉裂，如图 19-1a 所示。
- 模式Ⅱ——剪裂，如图 19-1b 所示。
- 模式III——撕裂，如图 19-1c 所示。

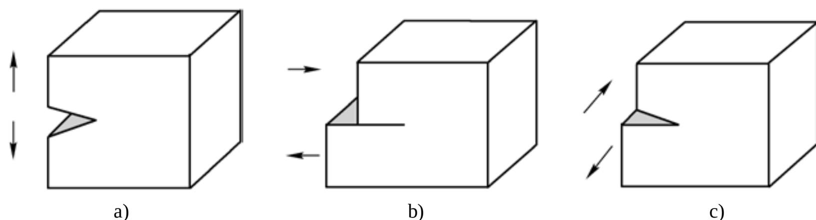


图 19-1　断裂模式

a) 拉裂（K_{I}） b) 剪裂（K_{II}） c) 撕裂（K_{III}）

19.1.2 断裂力学参数

典型的断裂力学参数，一般反映能量准则中的能量，或位于断裂变形区域内的应力幅值和变形区域的应力集中系数。在断裂力学中经常使用以下 3 个参数。

1）应力集中系数。

2）能量释放率。

3）J 积分。

前面两个参数只能用于线性弹性材料断裂分析中，而 J 积分则可用于线性弹性分析和非线性弹塑性材料的断裂分析中。

1．应力集中系数

对于线性弹性材料而言，位于裂纹顶端应力应变区域的应力和应变可以表示为：

$$\sigma_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta)$$

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} g_{ij}(\theta)$$

式中　K——应力集中系数；

$\sqrt{r}$——以裂缝顶端为圆心裂缝顶端的半径值，如图 19−2a 所示；

θ——以裂缝顶端为坐标系原点的特定坐标系中的角度值，如图 19−2 所示。

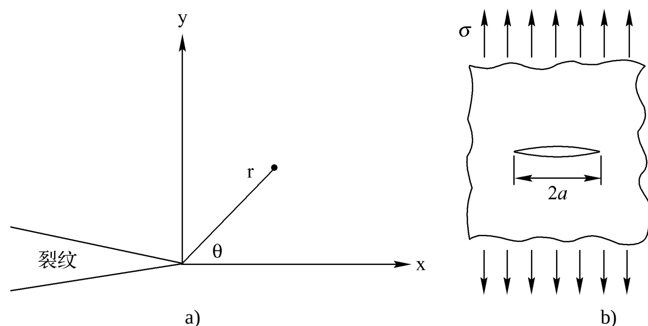


图 19−2　裂纹顶端和应力集中

a) 裂纹顶端坐标系与半径　b) 拉裂应力集中

对于断裂类型 I 拉裂而言，应力区域中有：

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}$$

2．能量释放率

能量准则认为，当裂纹扩展可用能量大于材料的抵抗能力时，裂纹就会发生扩展。能

量释放率 G 在弹性材料中可以用来反映断裂韧性。在单一断裂模式下，能量释放率可以定义为：

$$G = \frac{K^2}{E} = \frac{(1-v^2)K^2}{E}$$

式中 E——弹性模量；
v——泊松比。

等号右边的两个式子，具体采用哪个视条件而定，具体请参考帮助文档或有关书籍。

3．J 积分

J 积分是在弹塑性断裂力学中广泛采用的参数，其使用下式定义：

$$J = \lim_{\delta \to 0} \int_{\delta_0} \left[(W+T)\sigma_{Ii} - \sigma_{ij} \frac{\partial \boldsymbol{u}_j}{\partial x_I} \right] n_i \mathrm{d}\delta$$

式中 W——应变能量密度；
T——运动能量密度；
σ——应力；
$\boldsymbol{u}$——位移向量；
δ——计算积分区域的轮廓线。

在弹性材料的裂纹中，J 积分代表能量释放率；在非线性弹性材料的裂纹中，J 积分还考虑了裂纹顶端的应力幅值和变形区域。

以上是对 J 积分的简单描述，对于 J 积分的定义和计算方法，请参考帮助文档和有关书籍。

19.1.3 断裂力学仿真方法

断裂是两个表面相互分离的过程，或者说是材料在外力作用下逐渐损伤的过程，在 ANSYS Workbench 中可以使用 3 种方法进行断裂分析：

1）基于 VCCT 的接口单元法。使用接口单元，通过分离接口单元来对断裂进行分析。这种方法既可以对同种材料的断裂进行分析，也可以对生物材料系统中的界面脱落进行仿真。

2）内聚层法。使用接口单元或接触单元，通过分离表层材料和内聚层材料，来对表面分离现象进行仿真。

3）Gurson 模型是一种塑性模型，可以用来仿真可塑性材料的破坏。

这里只简单介绍 3 种断裂仿真方法，具体请参考帮助文档和有关书籍。

19.1.4 断裂分析流程

断裂分析的流程如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）嵌入裂纹区域网格。

8）设置分析选项。

9）定义初始条件。

10）定义边界条件。

11）求解。

12）查看结果。

13）保存并退出。

需要注意的事项包括：

1）裂纹在 ANSYS Workbench 17.0 中通过命令预制，通过嵌入现有网格而建立，所以在建立裂纹区域时，首先需划分网格。

2）裂纹在 ANSYS Workbench 17.0 中是一个带扩展前缘的模型，其前缘为椭圆环形，在建立时需要确定各个方向。通常情况下，需要定义局部坐标系，从而使得裂纹模型能够正确地进行计算。

19.2 断裂分析示例

本节通过示例对断裂分析的基本操作过程进行讲解。

19.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，在项目管理区创建分析项目 A，如图 19-3 所示。

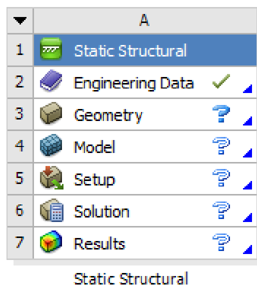


图 19-3 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap19”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 的 A2 栏中的“Geometry”，会进入到 DM 界面，查看模型如图 19-4 所示，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

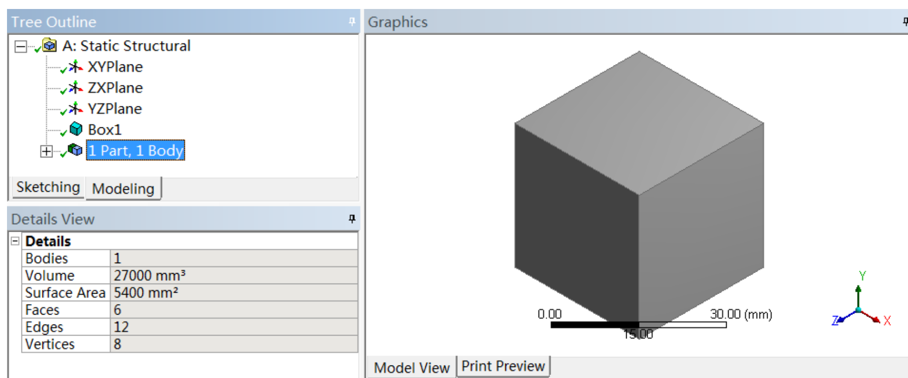


图 19-4　DM 模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮口退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，查看分析项目树结构图如图 19-5 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

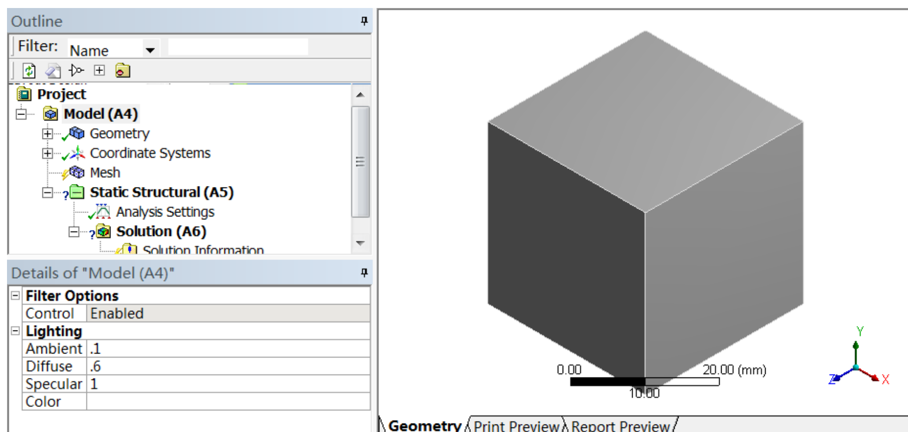


图 19-5　分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Soild”，此时即可在 Details of“Soild”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图 Geometry 前的?变为✓，表示材料已经添

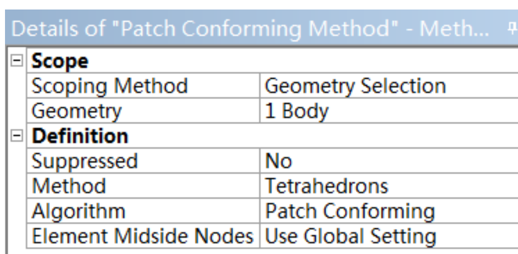
加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of “Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Method”，然后选择待划分的面体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮。

3）设置“Method”为“Tetrahedrons”，“Algorithm”为“Patch Conforming”，如图 19-6 所示。



Details of "Patch Conforming Method" - Meth...

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Midside Nodes	Use Global Setting

图 19-6　设置划分方法

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，如图 19-7 所示，生成网格如图 19-8 所示。

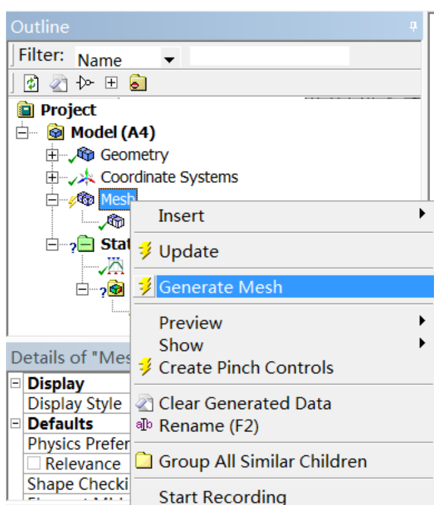


图 19-7　划分网格命令

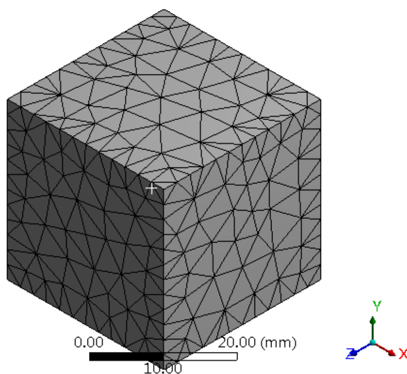


图 19-8　网格划分效果

6. 创建坐标系

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Coordinate Systems”选项，然后右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Coordinate System”，如图 19-9 所示。

2）单击创建的“Coordinate System”对象，设置“Principal Axis”→“Axis”为“X”，并设置“Define By”为“Hit Point Normal”，单击坐标系的原点（在 x 为 0 的面上），单击“Apply”按钮，如图 19-10 所示。

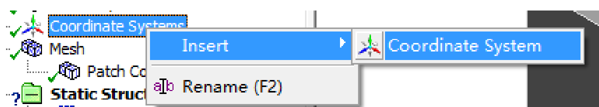
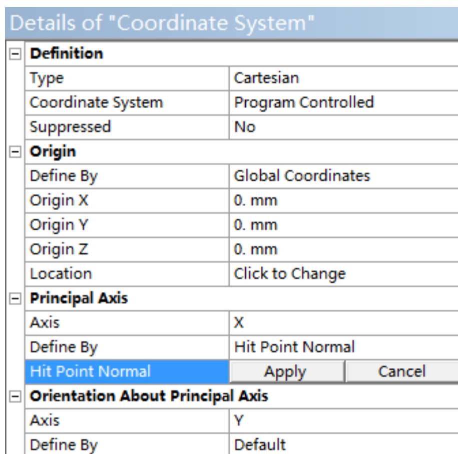


图 19-9　添加坐标系



Details of "Coordinate System"

Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System	Program Controlled
Suppressed	No
Origin	
Define By	Global Coordinates
Origin X	0. mm
Origin Y	0. mm
Origin Z	0. mm
Location	Click to Change
Principal Axis	
Axis	X
Define By	Hit Point Normal
Hit Point Normal	Apply / Cancel
Orientation About Principal Axis	
Axis	Y
Define By	Default

图 19-10　设置坐标系

7. 嵌入裂纹区域

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Model”项，在得到的工具栏中单击“Fracture”，创建“Fracture”对象。

2）右击“Fracture”对象，然后在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Crack”，如图 19-11 所示，创建“Crack”对象。

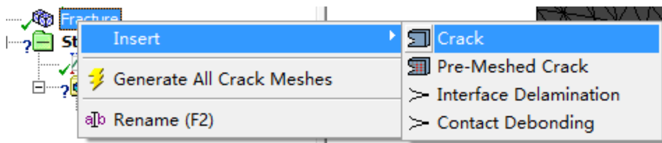
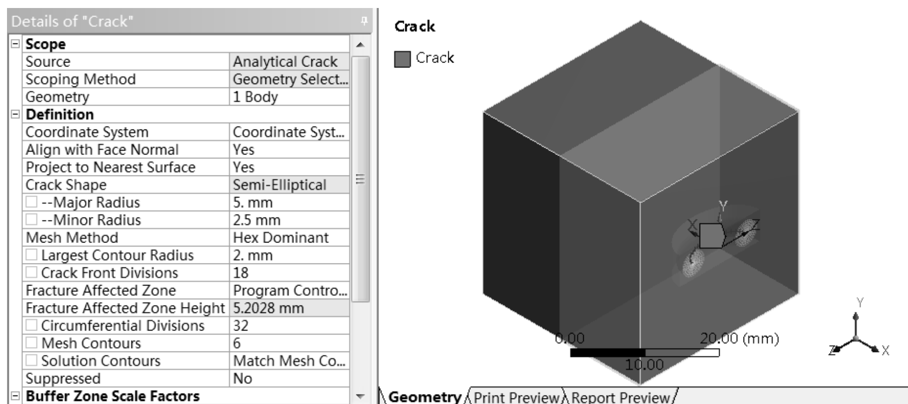


图 19-11　添加裂纹对象

3）选择 Crack 对象。选择图形区域中的模型，然后在“Geometry”后单击“Apply”按钮，设置其细节窗口中的部分参数，如图 19-12 所示并见表 19-1。



Details of "Crack"

Scope	
Source	Analytical Crack
Scoping Method	Geometry Select...
Geometry	1 Body
Definition	
Coordinate System	Coordinate Syst...
Align with Face Normal	Yes
Project to Nearest Surface	Yes
Crack Shape	Semi-Elliptical
--Major Radius	5. mm
--Minor Radius	2.5 mm
Mesh Method	Hex Dominant
Largest Contour Radius	2. mm
Crack Front Divisions	18
Fracture Affected Zone	Program Contro...
Fracture Affected Zone Height	5.2028 mm
Circumferential Divisions	32
Mesh Contours	6
Solution Contours	Match Mesh Co...
Suppressed	No
Buffer Zone Scale Factors	

图 19-12　设置裂纹对象

表 19-1　Crack 对象参数

Object Name	Crack
State	Fully Defined
Source	Crack
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Coordinate System	Coordinate System
Crack Shape	Semi-Elliptical
Major Radius	5mm
Minor Radius	2.5mm

4）右击 Crack 对象，在弹出的快捷菜单中选择“Generate All Crack Meshes”，划分裂纹。得到的裂纹如图 19-13 所示，最终网格如图 19-14 所示。

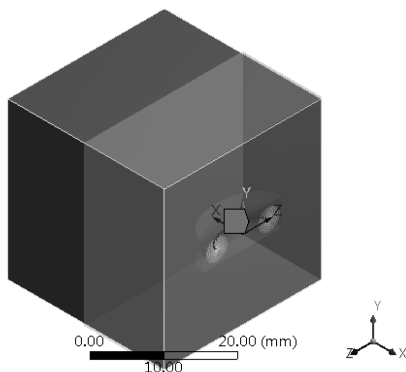


图 19-13　裂纹

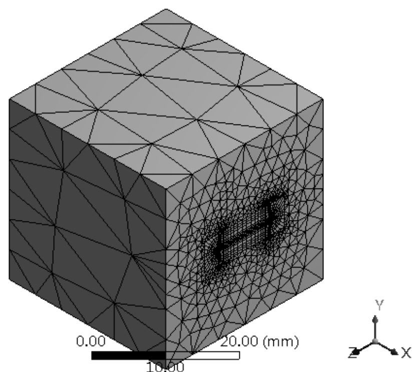


图 19-14　最终网格模型

8. **定义边界条件**

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选中“Fixed Support”，选择底面，单击 Details of“Fixed Support”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束。

4）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

5）选中“Force”，选择需要施加力的顶面，单击 Details of“Force”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置“Y Component”为“56000”。该设置施加了 *Y* 向大小为 56000N 的力，如图 19-15 所示。

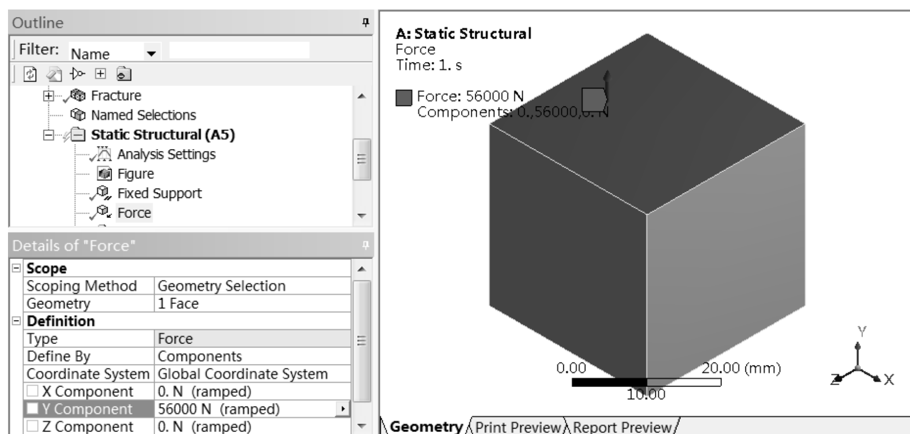


图 19-15 设置力载荷

6）得到的边界条件示意图如图 19-16 所示。

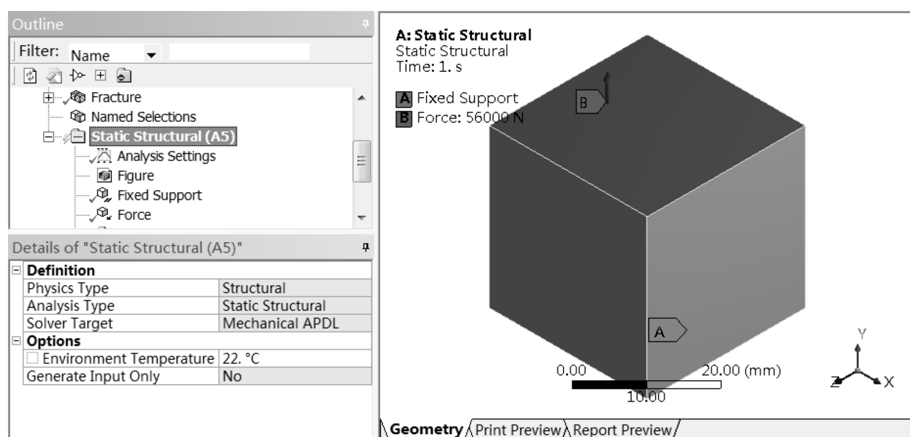


图 19-16 边界条件示意图

19.2.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

19.2.3 后处理

1. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力云图如图 19-17 所示。

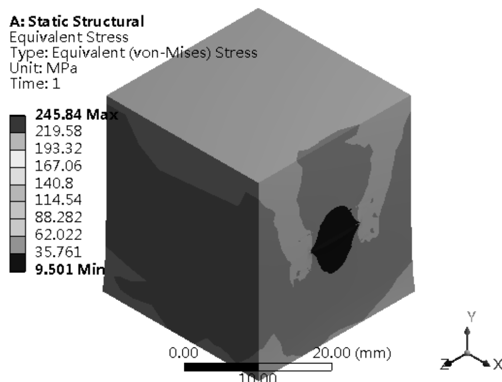


图 19-17　等效应力云图

5）选择 Solution 工具栏中的“Tools”→“Fracture Tool”，此时在树结构图中 Solution 下将出现“Fracture Tool”对象。

6）右击“Fracture Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“SIFS（K1）”。

7）右击“Insert”→“SIFS（K1）”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 SIFS（K1）结果如图 19-18 所示。

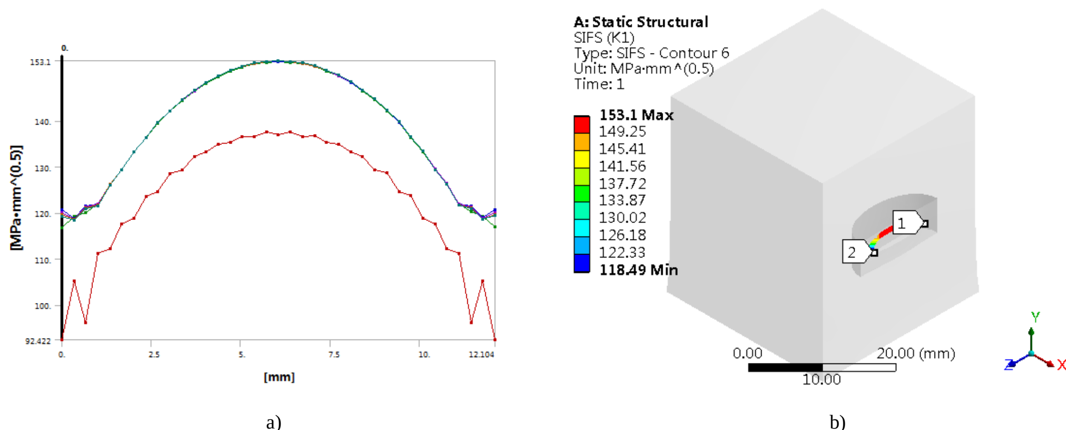


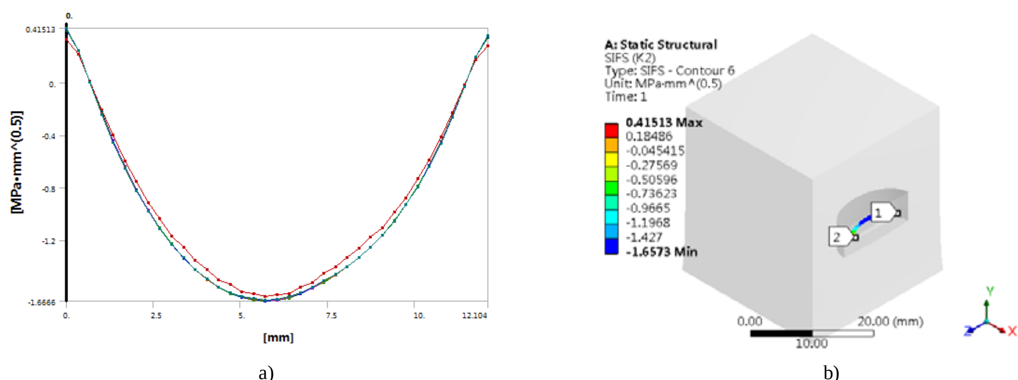
图 19-18　SIFS（K1）结果

a) 顶端数据曲线　b) 顶端路径图

8）右击“Fracture Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“SIFS（K2）”。

9）右击“Insert”→“SIFS（K2）”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 SIFS（K2）结果如图 19-19 所示。

10）右击“Fracture Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“SIFS（K3）”。

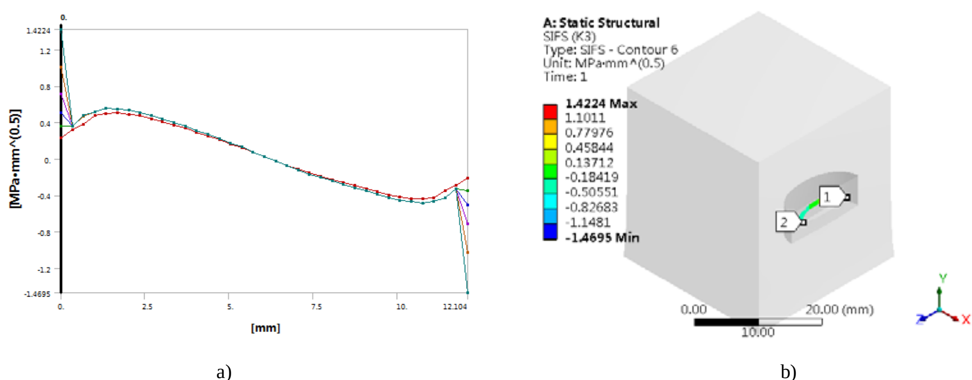


a) b)

图 19-19　SIFS（K2）结果

a) 顶端数据曲线　b) 顶端路径图

11）右击“Insert”→“SIFS（K3）”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 SIFS（K3）结果如图 19-20 所示。



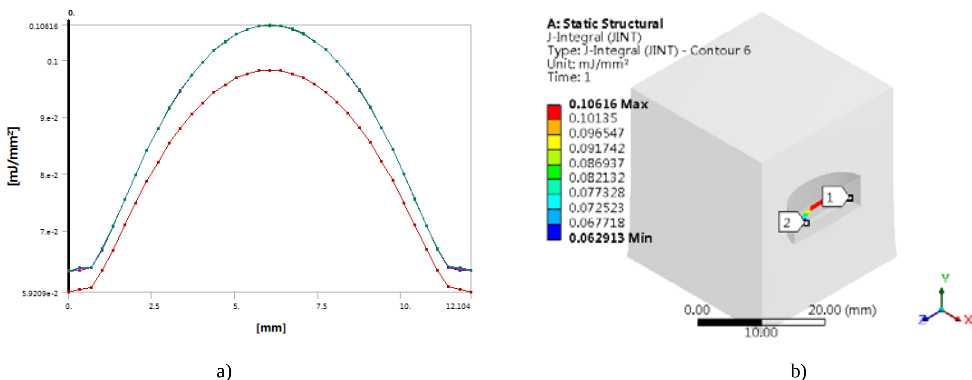
a) b)

图 19-20　SIFS（K3）结果

a) 顶端数据曲线　b) 顶端路径图

12）右击“Fracture Tool”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“J-Integral（JINT）”。

13）右击“Insert”→“J-Integral（JINT）”对象，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 J-Integral（JINT）结果如图 19-21 所示。



a) b)

图 19-21　J-Integral（JINT）结果

a) 顶端数据曲线　b) 顶端路径图

2. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 19-22 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

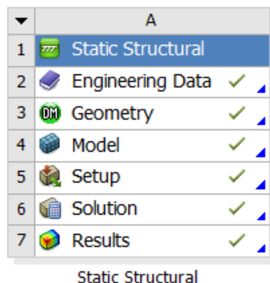


图 19-22　完成的分析项目

19.3　本章小结

本章介绍了断裂分析的基本操作过程。ANSYS Workbench 自带程序计算断裂参数，包括 J 积分、能量释放率和应力集中系数等。进行计算的前处理，关键在于断裂区域的建模处理。本章使用算例说明了断裂区域的建模处理和断裂参数的计算过程。断裂计算所涉及的知识远超出本书所述，更多的断裂参数计算相关内容，可以参考帮助文档和其他文献。



第 20 章 模型的简化分析

结构如果呈现出循环对称特点，就可以采用模型的简化分析的方式，仅对结构的一个基本循环扇区进行分析得到整个模型的解，这将使计算量大幅降低。本章介绍使用 ANSYS Workbench 进行循环对称结构分析的操作。

学习目标：

- 理解进行模型简化分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行模型的简化分析。

20.1 模型的简化分析基础

对于大多数循环对称结构，其模型都可以进行简化，即只分析其中的一个循环的基本部分。如图 20−1 中所示的一个普通齿轮零件，可以按照其单个齿所占的角度等分模型，再做分析利用其循环对称的结构，只处理均分后的单齿模型。

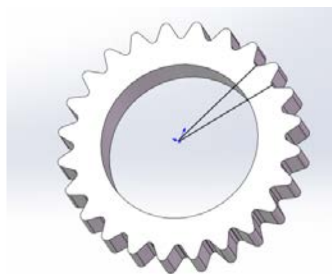


图 20−1 普通齿轮模型

20.1.1 分析概览

使用循环对称结构分析可以节省计算时间和 CPU 资源，并且可以查看整个结构的分析结构。其计算过程为：

1）计算单个循环区域的行为特性。

2）使用求得的特性来计算整个结构的行为特性。

例如，通过对一个涡轮（具有 36 个同样的叶片）的一个 10°的区域进行分析，就可以得到其整个叶轮 360°模型的结果。

20.1.2 简化模型

循环对称结构中，反映结构特征并用于建模的部分称作基本扇区。基本扇区在全局圆柱坐标系中旋转重复 *n* 次即能生成整个模型。

扇区沿对称中心径向方向延伸的两条线或面有两个边缘，在 ANSYS 中根据它们对应的圆周角的大小，分别称为上边缘和下边缘，而两个边缘之间对应的圆心角称为扇区角。

20.1.3 模型的简化分析流程

模型的简化分析的基本流程如下。

1）创建分析项目。
2）定义材料数据。
3）添加几何模型。
4）定义零件行为，包括循环对称特性。
5）定义连接。
6）划分网格。
7）设置分析选项。
8）定义初始条件。
9）定义边界条件。
10）求解。
11）查看结果。
12）保存并退出。

在定义循环对称特性时需要找到拓扑属性完全一致的面，分别设为扇区底面和扇区顶面，才能创建循环对称扇区。

20.2　模型的简化分析示例

本节通过示例对模型的简化分析的基本操作流程进行讲解。

20.2.1　前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下），选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，在项目管理区创建分析项目 A，如图 20-2 所示。

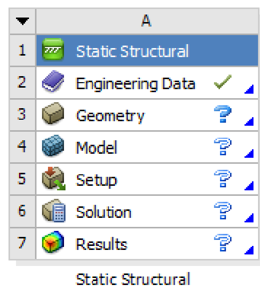


图 20-2　分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap20”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面，查看模型如图 20-3 所示，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

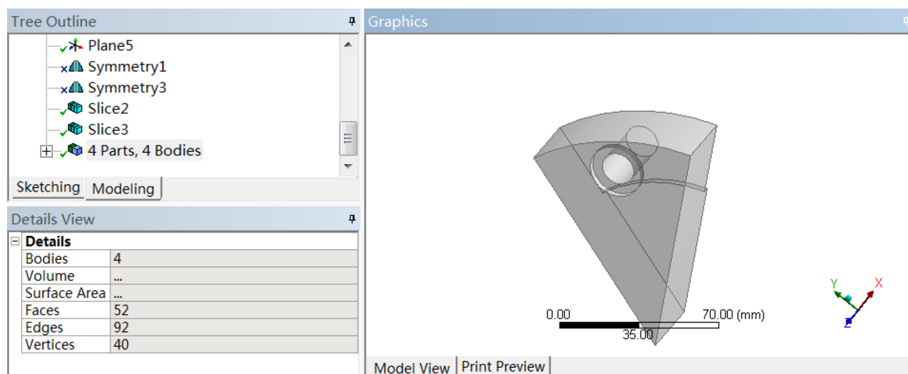


图 20-3　DM 模型

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，得到分析项目树结构图，如图 20-4 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。导入的完整模型如图 20-5 所示。

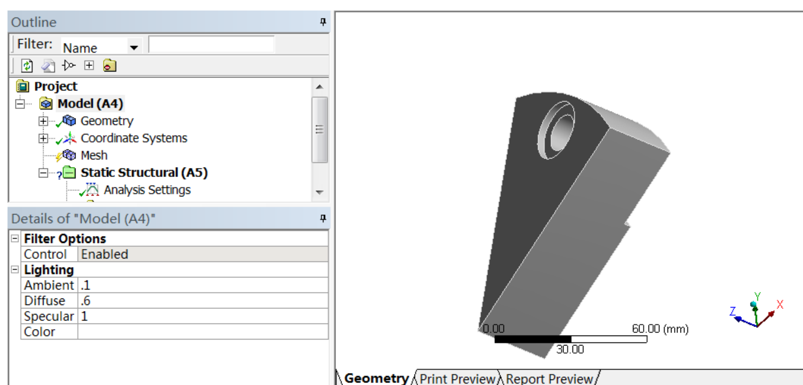


图 20-4　分析项目树结构图

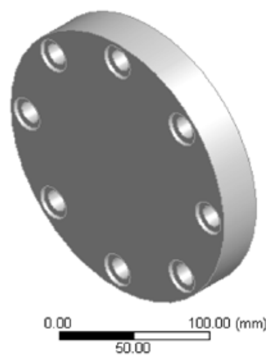


图 20-5　完整模型

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Soild”，此时即可在 Details of“Soild”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✔，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5. 定义扇区

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Symmetry”，然后右击，在弹出的快

捷菜单中选择“Insert”→“Cyclic Region”，如图 20-6 所示。此时树结构图中出现“Cyclic Region”对象。

2）单击“Cyclic Region”对象，首先选取模型的一个侧面，然后单击细节窗口中“Low Boundary”中的“Apply”按钮，则将该面设置为扇区底面，设置的细节窗口参数如图 20-7 所示。

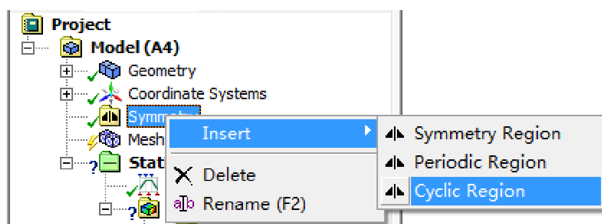
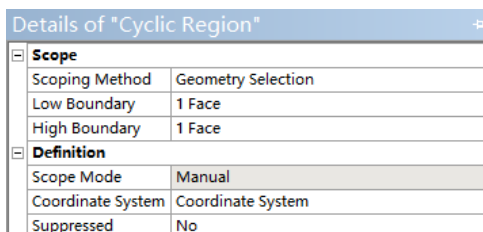


图 20-6 添加扇区



Details of "Cyclic Region"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Low Boundary	1 Face
High Boundary	1 Face
Definition	
Scope Mode	Manual
Coordinate System	Coordinate System
Suppressed	No

图 20-7 设置扇区

3）首先选取模型的另一个侧面，然后单击细节窗口中“High Boundary”中的“Apply”按钮，则将该面设置为扇区顶面。

4）设置得到的扇区结果如图 20-8 所示。

6. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of “Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 20-9 所示。

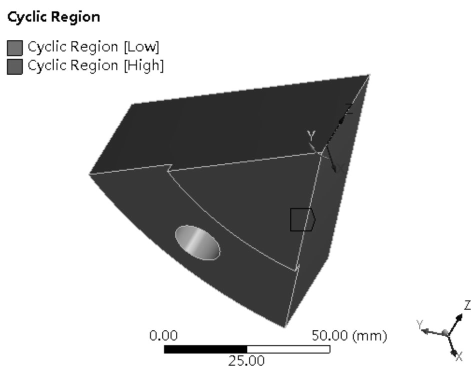


图 20-8 扇区模型

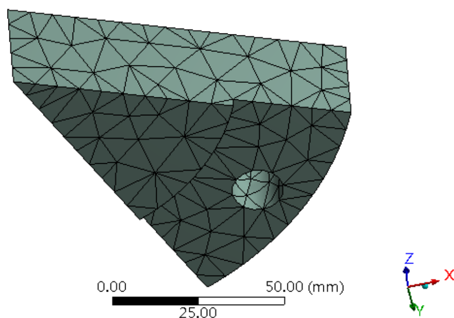


图 20-9 网格模型

7. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选中“Fixed Support”，选择需要施加固定约束的沉孔面，单击 Details of“Fixed

Support”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中面上施加固定约束。

4）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Pressure”，此时在树结构图中会出现“Pressure”选项。

5）选中“Pressure”，选择需要施加压力的凸起面，单击 Details of “Pressure”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时在“Magnitude”选项下设置压力为 10MPa 的面载荷。

6）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，查看边界条件示意图，如图 20-10 所示。

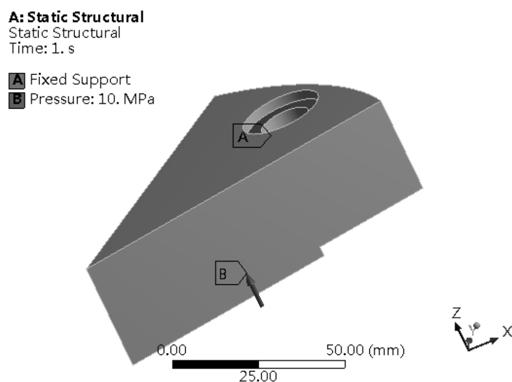


图 20-10 边界条件示意图

20.2.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

20.2.3 后处理

1. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的总变形的等值线云图如图 20-11 所示。

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力的等值线云图如图 20-12 所示。

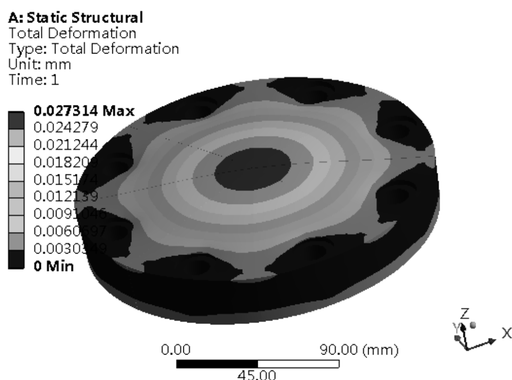


图 20-11　总变形的等值线云图

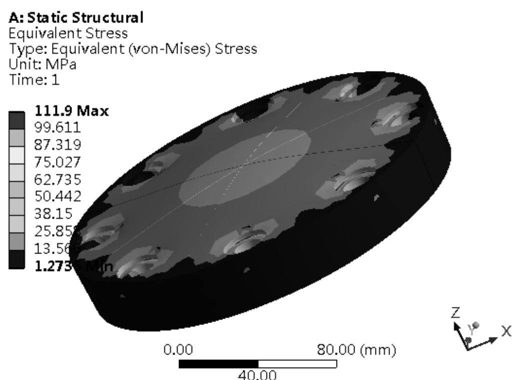


图 20-12　等效应力的等值线云图

2. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 20-13 所示。

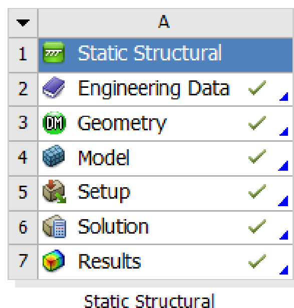


图 20-13　完成分析的项目工程图

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

20.3　本章小结

本章介绍了进行模型的简化分析的操作，可以进行模型简化分析的分析类型主要包括静力学分析、模态分析、屈曲分析和谐响应分析。在实际分析中，只要出现循环对称的结构，如齿轮、带轮等机械领域中常见的结构循环对称的圆零件，都可以采用本章介绍的操作方法进行分析，以提高分析效率。

第 21 章　子模型分析

在进行有限元分析时，常需面对求解精度和计算资源的矛盾，而这时通常会牺牲计算精度。然而，牺牲计算精度的计算结果在结果量梯度高的区域往往不可接受。子模型是能使模型部分区域的结果更精确的有限元技术，能在一定程度上解决上述问题。本章将介绍子模型分析有关操作。

学习目标：

➢ 理解进行子模型分析的步骤。

➢ 练习使用 ANSYS Workbench 进行子模型分析。

21.1　子模型分析基础

21.1.1　子模型概述

子模型是获得模型部分区域中更加精确解的有限元技术。在有限元分析中往往出现这种情况：对于用户关心的区域，如应力集中区域，网格太疏不能得到满意的结果，而对于这些区域之外的部分，网格密度已经足够了，如图 21−1a 所示。要得到这些区域的较精确的解，可以采取两种办法：

1）用较细的网格重新划分并分析整个模型。

2）只在关心的区域细化网格并对其进行分析，如图 21−1b 所示。

显然，前一个方法太耗费资源，后一个方法即为子模型技术，更有优势。

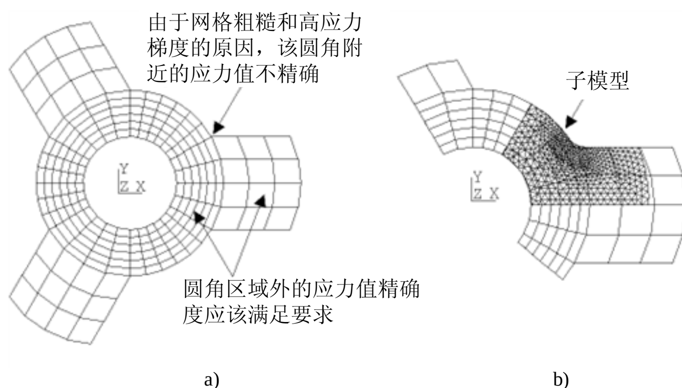


图 21−1　轮毂和轮辐的子模型

a) 粗糙模型　b) 叠加的子模型

子模型方法又称为切割边界位移法或特定边界位移法。切割边界就是子模型从整个较粗糙的模型分割开的边界，整体模型切割边界的计算位移值即为子模型的边界条件。

子模型基于圣维南原理，即如果实际分布载荷被等效载荷代替以后，应力和应变只在载荷施加的位置附近有改变。这说明只有在载荷集中位置才有应力集中效应，如果子模型的位置远离应力集中位置，则子模型内就可以得到较精确的结果。

ANSYS Workbench 程序并不限制子模型分析必须为结构（应力）分析。子模型也可以有效地应用于其他分析中，如在电磁分析中，可以使用子模型计算感兴趣区域的电磁力。

除了能求得模型某部分的精确解以外，子模型技术还有如下优点：

1）减少甚至取消了有限元实体模型中所需的复杂的传递区域。

2）使得用户可以在感兴趣的区域就不同的设计（如不同的圆角半径）进行分析。

3）帮助用户证明网格划分是否足够细。

使用子模型的一些限制如下。

1）子模型只对 3D 分析有效。

2）子模型的原理要求切割边界应远离应力集中区域。

21.1.2 子模型分析流程

子模型分析需要分别进行粗糙模型分析和子模型分析，两个过程的流程均可以概括如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

需要注意的事项主要包括：

1）必须在子模型分析前进行粗糙模型的分析，并将分析的结果导入到子模型分析中作为输入。

2）子模型中必须定义好导入载荷的面来接收来自粗糙模型的结果数据。

21.2 子模型分析示例

本节通过示例来说明子模型分析完整的操作过程。

21.2.1 粗糙模型分析

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 15.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A。

3）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，即可在项目管理区创建分析项目 B。

4）在分析项目 A 中，拖曳“Solution”至分析项目 B 的“Setup”上，显示红色方框时，这时分析项目 A 的求解数据将会作为输入导入到项目 B 中，如图 21-2 所示。

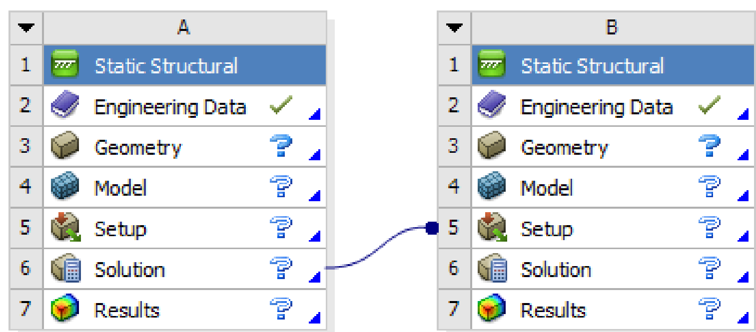


图 21-2 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap21-1”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面，查看模型如图 21-3 所示，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。



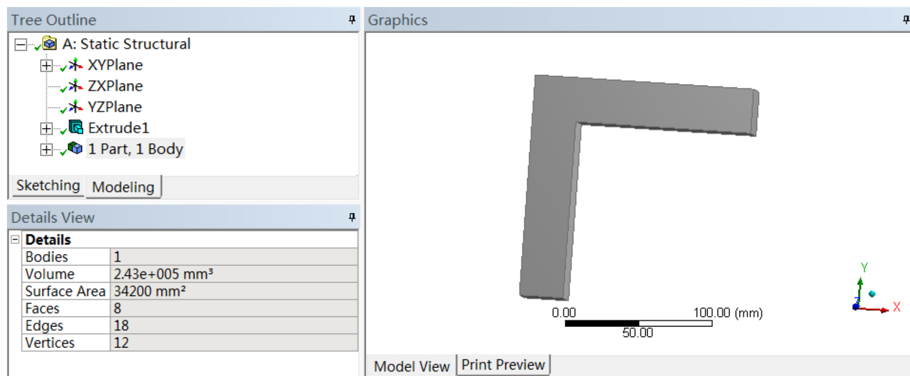


图 21-3　DM 模型

4）单击 Generate 按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，得到分析项目树结构图如图 21-4 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

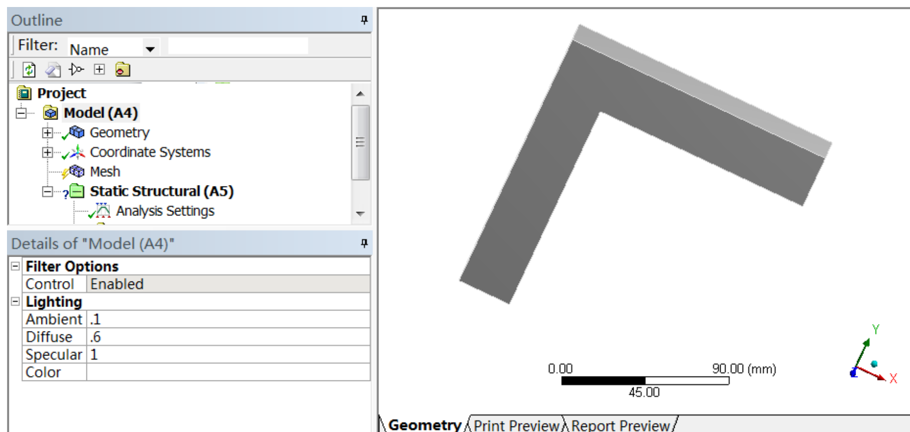


图 21-4　分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✔，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”命令，生成网格最终的效果如图 21-5 所示。

6. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选中“Fixed Support”，选择底面，单击 Details of“Fixed Support”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束。

4）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

5）选中“Force”，选择需要施加力的支撑端面，单击 Details of “Force”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置参数如图 21-6 所示。该设置施加了 *Y* 向大小为“2750N”的力。

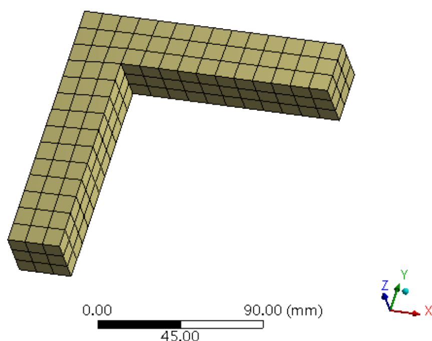
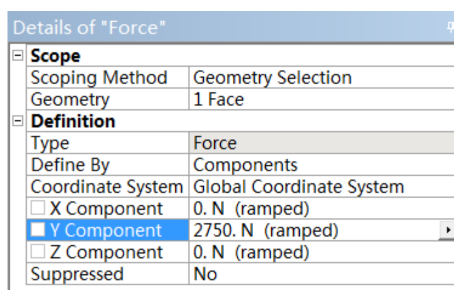


图 21-5　粗糙模型网格



Details of "Force"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0. N (ramped)
Y Component	2750. N (ramped)
Z Component	0. N (ramped)
Suppressed	No

图 21-6　设置力载荷

6）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，查看以上设置得到的边界条件如图 21-7 所示。

7. 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

8. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Total Deformation”细节窗口中“Geome-try”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体变形云图如图 21-8 所示。

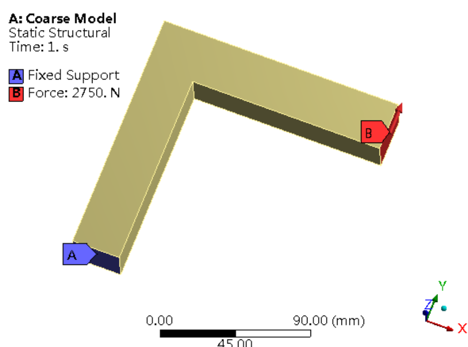


图 21-7 边界条件示意图

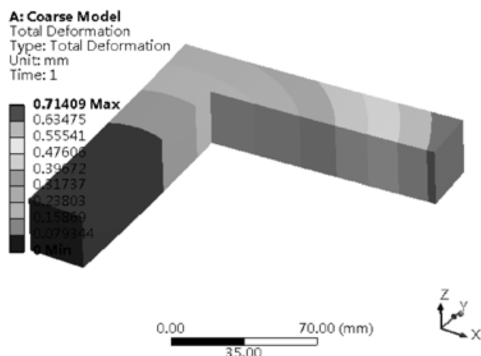


图 21-8 整体变形云图

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”命令，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力云图如图 21-9 所示。

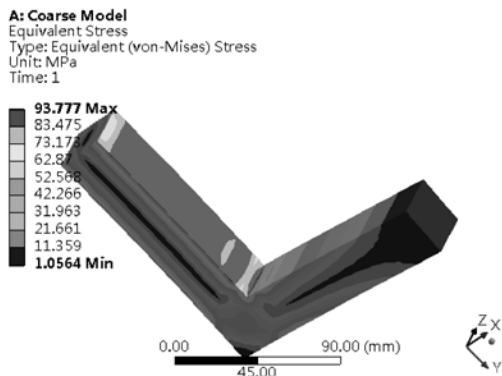


图 21-9 等效应力云图

9. 退出

单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

21.2.2 子模型分析

1. 定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

2. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap21-2”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面，查看子模型如图 21-10 所示，此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

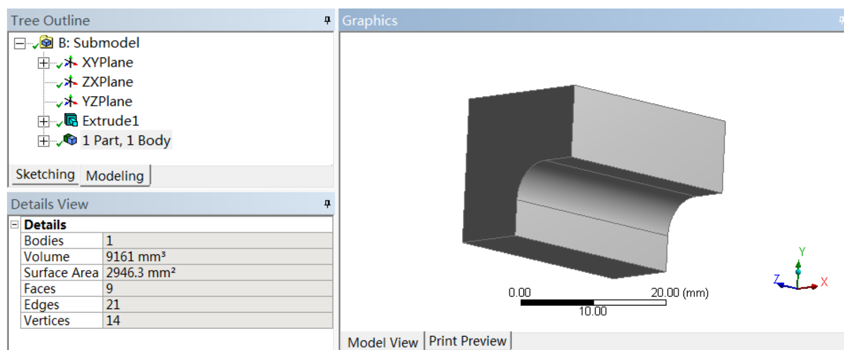


图 21-10　DM 子模型

4）单击 Generate 按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

3. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，查看分析项目树结构图，如图 21-11 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

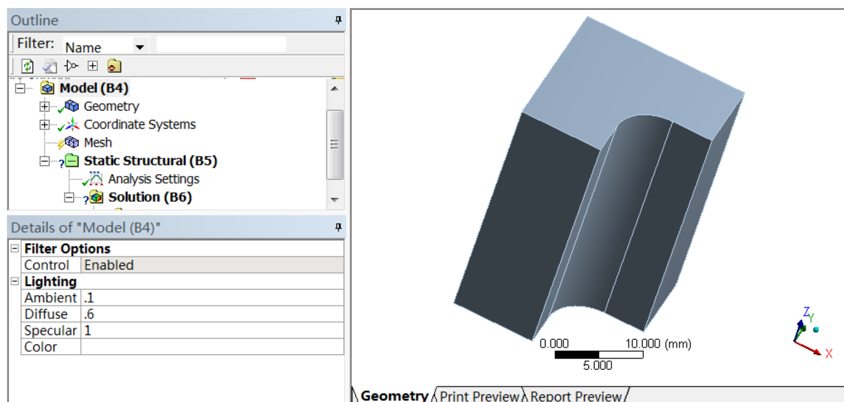


图 21-11　分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中去。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

4. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上右击，选择“Insert”→“Sizing”，然后选择待划分的体，在细节窗口中的“Geometry”下单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“1mm”。

3）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 21-12 所示。

5. 定义集合

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Named Selections”，在工具栏中单击“Named Selection”，此时在树结构图中会出现“Selection”选项。

2）选择位于模型中的面，然后在 Selection 的细节窗口（图 21-13）单击“Geometry”后，再单击其后“Apply”按钮，此时创建的集合包含的面如图 21-14 所示，这些面将用于导入载荷。

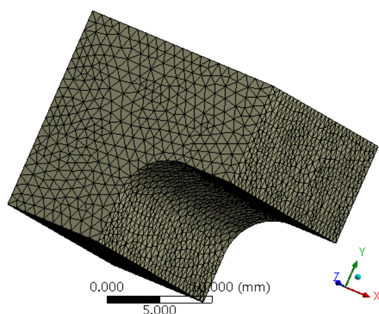


图 21-12　子模型网格

Details of "Selection"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Faces
Definition	
Send to Solver	Yes
Visible	Yes
Program Controlled Inflation	Exclude
Statistics	
Type	Manual
Total Selection	3 Faces
Surface Area	1800. mm²
Suppressed	0
Used by Mesh Worksheet	No

图 21-13　Selection 细节

6. 导入边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Submodeling（Solution）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Imported Loads”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Imported Displacement”选项。

3）选中“Imported Displacement”，设置“Scoping Method”为“Named Selection”，然后设置“Named Selection”为“Selection”，如图 21-15 所示。

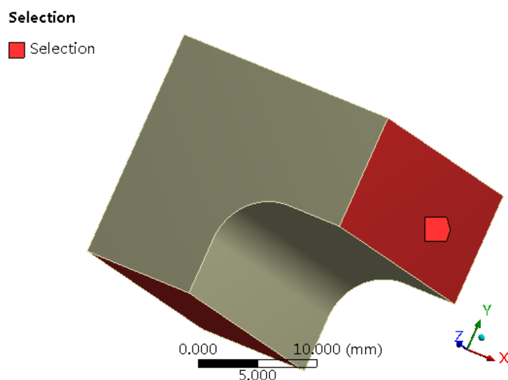


图 21-14　集合包含的面

Details of "Imported Displacement"

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Selection
Definition	
Type	Imported Displacement
Tabular Loading	Program Controlled
Suppressed	No
Override Constraints	No
Source Bodies	All
Submodeling Type	3D to 3D
Transfer Key	Solid-Solid
Source Time	Worksheet
Graphics Controls	
Component	All
Display Source Points	Off
Display Source Point Ids	Off
Settings	
Mapping Control	Program Controlled
Mapping	Profile Preserving
Weighting	Shape Function
Transfer Type	Volumetric

图 21-15　导入边界条件设置

4）以上设置得到的载荷分布图如图 21–16 所示。

7. 求解

在 Outline 树结构图中的“Static Structural（B5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

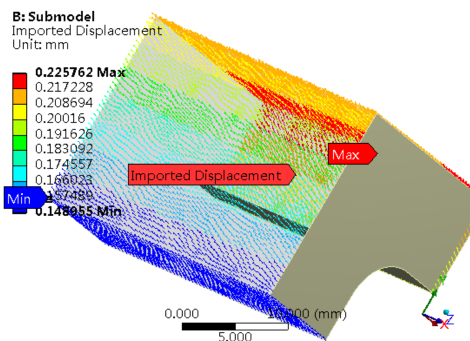


图 21–16 载荷分布图

8. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Total”，此时在树结构图中会出现“Total Deformation”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Total Deformation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体变形的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Total Deformation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体变形云图如图 21–17 所示。

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的等效应力云图如图 21–18 所示。

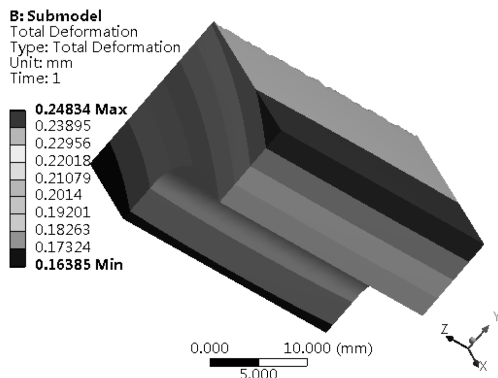


图 21–17 整体变形云图

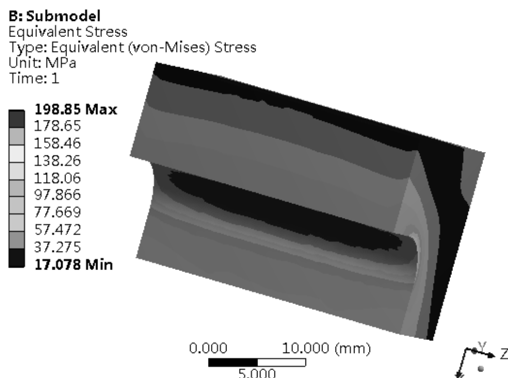


图 21–18 等效应力云图

9. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 21–19 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

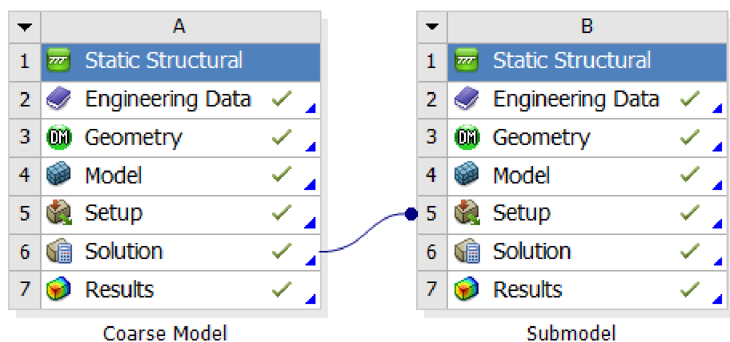


图 21-19　完成分析的项目工程图

21.3　本章小结

本章介绍了子模型分析有关内容，主要内容包括子模型的基本概念和子模型分析的过程。其中，子模型分析的过程包括创建并分析较粗糙的基础模型、创建子模型、边界插值和分析子模型等。子模型在实际计算中有很广泛的应用，希望读者尽量掌握。



第22章 热 分 析

在工程领域，结构的热分析有着非常重要的应用。通过 ANSYS Workbench 进行热分析，可以计算结构或部件的温度分布与其他热学物理参数，如热量、热梯度、热流密度（热通量）等。本章将对静态热分析和瞬态热分析在 ANSYS Workbench 中的实现过程进行介绍。

学习目标：

- 理解进行热分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行热分析。

22.1 热分析基础

ANSYS Workbench 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程，用有限元法计算各节点的温度，并导出其他热物理参数。

热分析的主要物理过程包括热传导、热对流及热辐射 3 种热传递物理过程。此外，还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。本章将分别介绍这 3 个物理过程中的两种，即热传导和热对流。

22.1.1 单位

在 ANSYS Workbench 中进行热分析可以采用的部分单位见表 22-1。

表 22-1 热分析中的部分单位

物 理 量	单 位
温度	K
能量	J
功率	W
热流密度	W/m^2
热导率	W/(m·K)
对流系数	W/(m^2·K)
比热容	J/(kg·K)
焓	W/m^3

22.1.2 基础理论

1．能量守恒定律

热分析遵循能量守恒定律，其描述如下。

对于一个封闭的系统（没有质量的流入或流出）有：

$$Q-W=\Delta U+\Delta EK+\Delta EP$$

式中 Q——热量；

W——做功；

ΔU——系统内能变化量；

ΔEK——系统动能变化量；

ΔEP——系统势能变化量。

对于大多数工程传热问题ΔEK、ΔEP 均为 0，即动能与势能保存不变，而且通常不考虑作功，即 W 也为 0，那么上式可简化为：

$$Q=\Delta U$$

对于稳态热分析：Q=0，即流入系统的热量等于流出系统的热量。

对于瞬态热分析：q=dU/dt，即流入或流出的热传递速率 q 等于系统内能的变化。

2．热传导

热传导是指完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循下式：

$$q''=-k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$$

式中 q''——热流密度（W/m^2）；

k——热导率[W/(m·℃)]。

负号表示热量流向温度降低的方向。

3．热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以用下式描述：

$$q''=h(T_\mathrm{s}-T_\mathrm{b})$$

式中 q''——热流密度（W/m^2）；

h——换热系数；

T_s——固体表面的温度；

T_b——环境中流体的温度。

4．热辐射

热辐射是指物体发射电磁波被其他物体吸收并转变为热的热量交换过程。物体温度越高，单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无需任何介质。实质上，在真空中的热辐射效率最高。

工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量，其热量传递可用下式计算：

$$\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_i}-F_{ji}\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right)\frac{Q_i}{A_i}=\sum_{i=1}^{N}\left(\delta_{ij}-F_{ji}\right)\sigma T_i^4$$



式中 N——辐射面总数；

δ_{ij}——克罗内克符号；

ε_i——辐射面 i 的有效发射率；

F_{ji}——辐射视角系数；

Q_i——辐射面 i 损失的热量；

A_i——辐射面 i 面积；

σ——斯忒藩–玻耳兹曼常数；

T_i——辐射面绝对温度。

由上式中可以看出，包含热辐射的热分析是高度非线性的，在本书中将不对辐射分析过程进行讲述，如有需要请参考帮助文档。

5．稳态传热

如果系统的净热流率为 0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。

6．瞬态传热

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。

22.1.3 热分析流程

热分析的流程与力学分析的流程基本一致，具体如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置分析选项。

8）定义初始条件。

9）定义边界条件。

10）求解。

11）查看结果。

12）保存并退出。

需要注意的事项包括：稳态热分析和瞬态热分析在 ANSYS Workbench 17.0 中对应着不同的分析系统，分别为 Static-state Thermal 和 Transient Thermal。

22.2 热分析示例

本节对稳态热分析和瞬态热分析的操作流程进行示例。

22.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static-state Thermal”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A。

3）在工具箱中的“Analysis System”→“Transient Thermal”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Model”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B，此时相关联项的数据可共享，如图 22-1 所示。

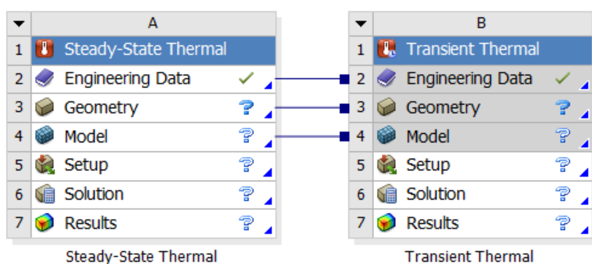


图 22-1 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入如图 22-2 所示的工程数据界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

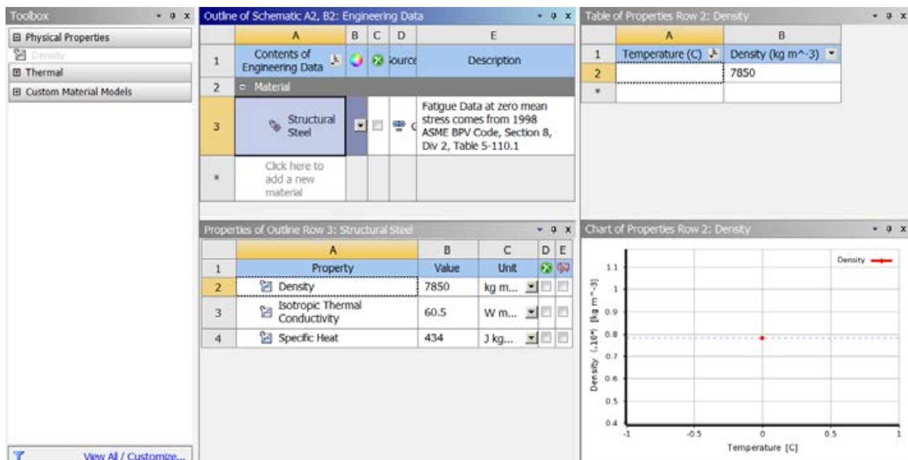


图 22-2 工程数据界面

2）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，此时原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 窗口出现，如图 22-3 所示。

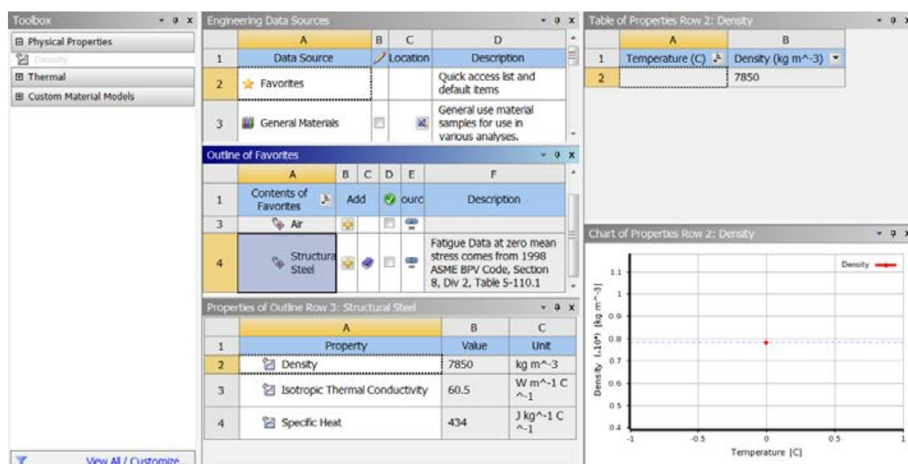


图 22-3　工程数据库界面

3）单击 Engineering Data Sources 窗口中的“General Materials”，此时 Outline 窗口显示为 Outline of General Material。

4）在 Outline of General Material 窗口中，选择“Concrete”，并单击其后面的“添加”按钮，如图 22-4 所示。

Outline of General Materials

	A	B	C	D	E
1	Contents of General Materials	Add		Source	Description
2	Material				
3	Air			Gen	General properties for air.
4	Aluminum Alloy			Gen	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
5	Concrete			Gen	
6	Copper Alloy			Gen	

图 22-4　添加 Concrete 材料

5）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，返回到初始界面中，此时 Outline of Schematic A2 中将显示添加的 Concrete，如图 22-5 所示。

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data

	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Concrete			
4	Structural Steel			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

图 22-5　Outline of Schematic A2 显示添加的 Concrete

6）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A3 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→

"Browse"，此时会弹出"打开"对话框。

2）在弹出的"打开"对话框中选择文件路径，导入"chap22"几何体文件，此时 A3 栏"Geometry"后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A3 栏"Geometry"，会进入到 DM 界面，查看几何模型如图 22-6 所示。此时如果设计树中显示⚡，表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

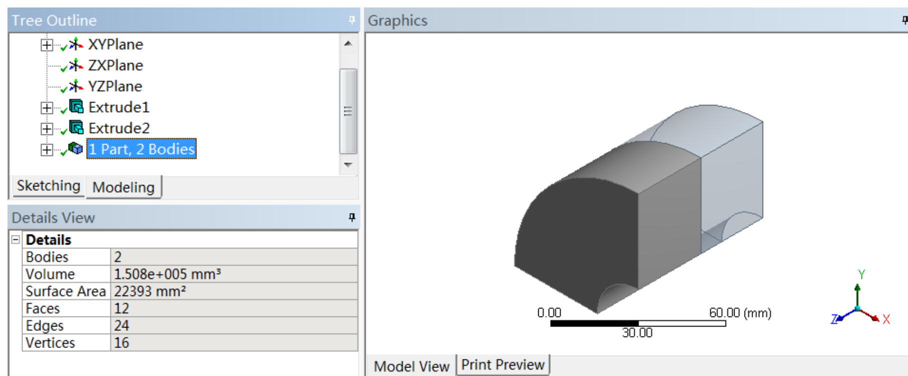


图 22-6 DM 模型

4）单击 Generate 按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的"关闭"按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 的 A4 栏中的"Model"项，进入 Mechanical 界面，得到分析项目树结构图如图 22-7 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

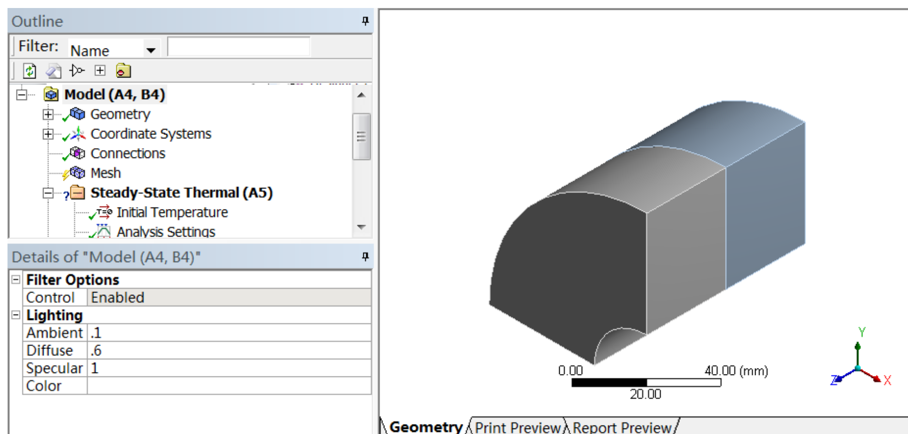


图 22-7 分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中"Geometry"选项下的第 1 个

"Solid"，此时即可在 Details of "Solid" 细节窗口中给模型添加材料，如图 22-8 所示。

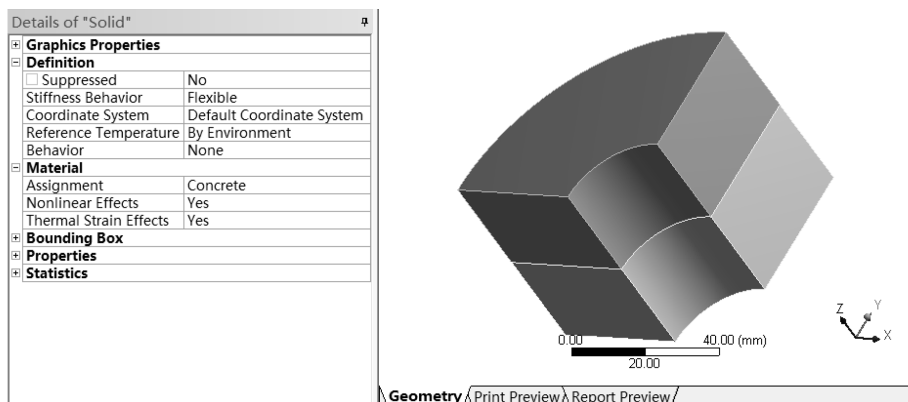


图 22-8　添加 Concrete 材料

3）单击参数列表中的"Material"选项下"Assignment"黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择"Concrete"即可将其添加到模型中。此时树结构图"Geometry"前的?变为✓，表示材料已经添加成功。

5. 构造路径

1）选择 Outline 树结构图中的"Model"，在工具栏中选择"Construction Geometry"，此时在树结构图中出现"Construction Geometry"对象。

2）在 Construction Geometry 对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择"Insert"→"Path"，此时在树结构图中出现"Path"对象。

3）选择"Path"对象，在其细节窗口中设置参数如图 22-9 所示。

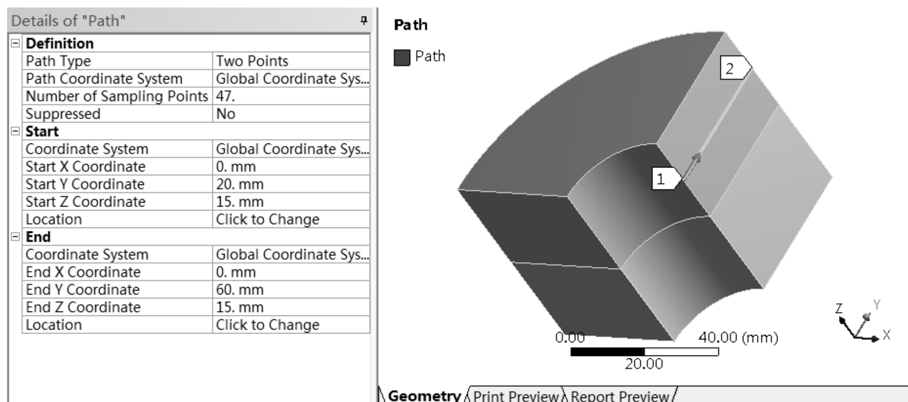


图 22-9 "Path"对象设置

4）在 Construction Geometry 对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择"Insert"→"Path"，此时在树结构图中出现"Path 2"对象。

5）选择"Path 2"对象，在其细节窗口中设置参数如图 22-10 所示。

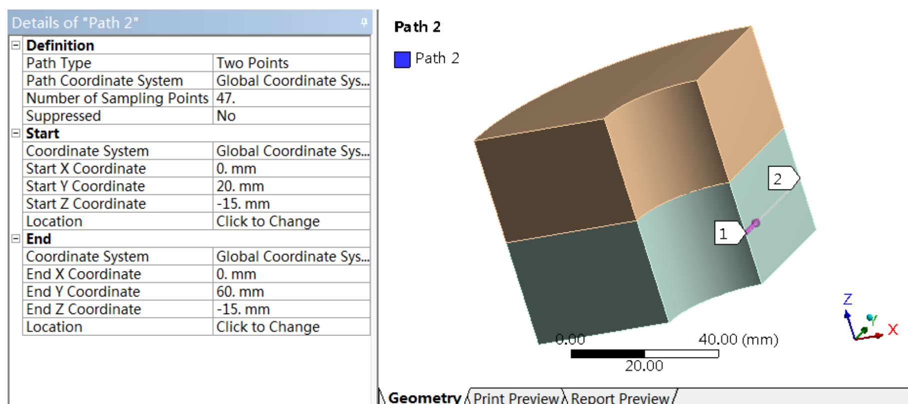


图 22-10 “Path 2”对象设置

6. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of “Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 22-11 所示。

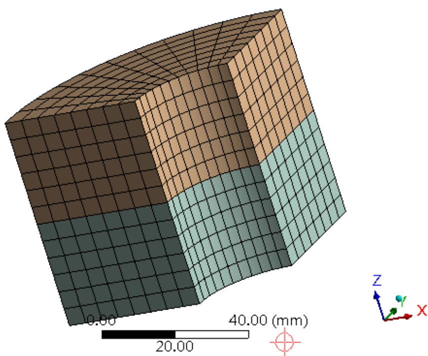


图 22-11 网格划分

22.2.2 稳态热分析

1. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static-state Thermal（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Temperature”选项。

3）选择“Temperature”，在其细节窗口中设置“Magnitude”为“22℃”，然后选择两个体的内表面，再单击“Geometry”下的“Apply”按钮确认。

4）选择 Environment 工具栏中的“Convection”命令，此时在树结构图中会出现“Convection”选项。

5）选择“Convection”，在其细节窗口中设置“Film Coefficient”为“10W/mm^2 • ℃”，如

图 22-12 所示，然后选择两个体的外表面，再单击“Geometry”下的“Apply”按钮确认。

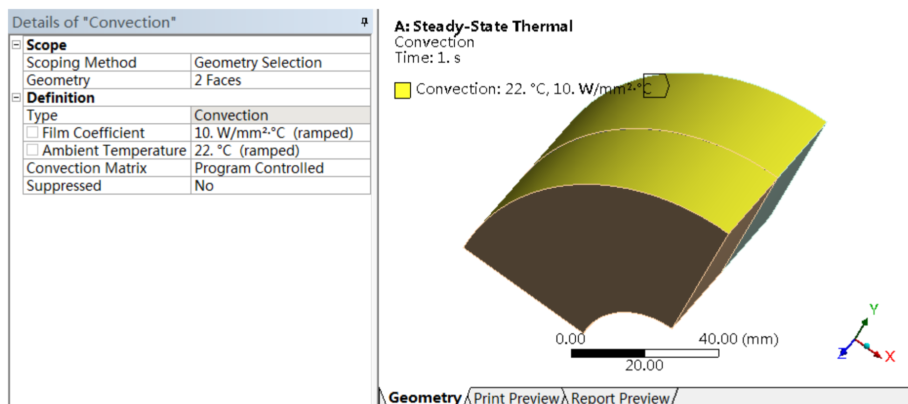


图 22-12 “Convection”选项细节设置

6）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static-state Thermal（A5）”选项，查看设置的边界条件，如图 22-13 所示。

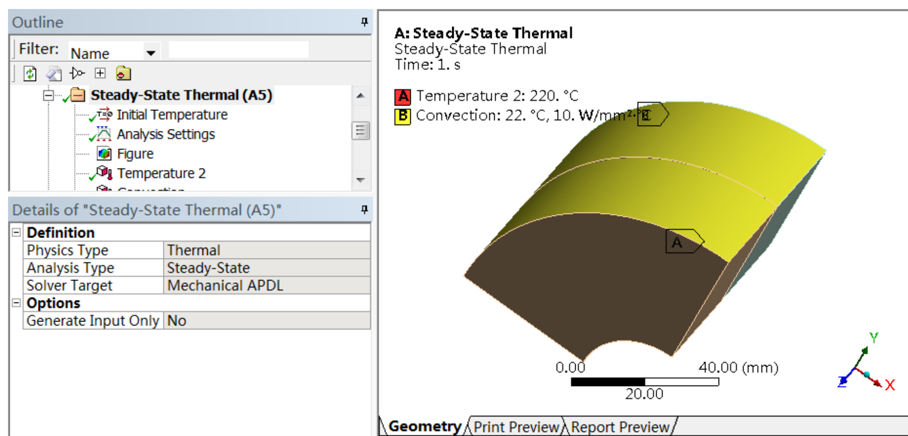


图 22-13 边界条件示意图

2. 求解

在 Outline 树结构图中的“Static-state Thermal（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

3. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Thermal”→“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Temperature”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Temperature”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体温度的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Temperature”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的温度场图形如图 22−14 所示。

5）选择 Solution 工具栏中的“Thermal”→“Total Heat Flux”，此时在树结构图中会出现“Total Heat Flux”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Total Heat Flux”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体热流的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Total Heat Flux”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的热流场图形如图 22−15 所示。

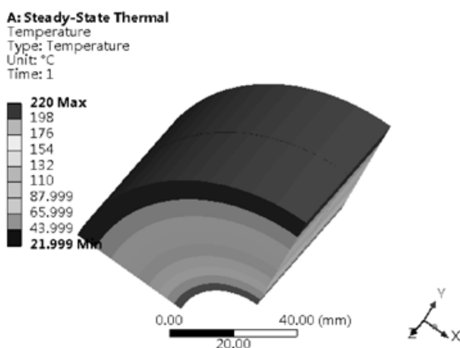


图 22−14　温度场

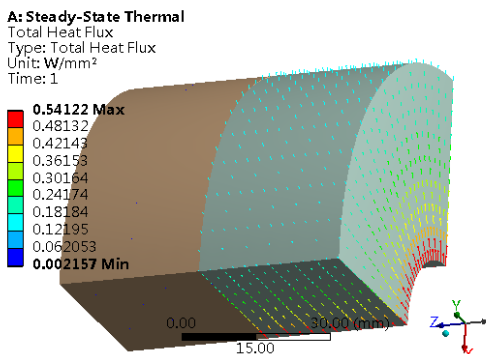
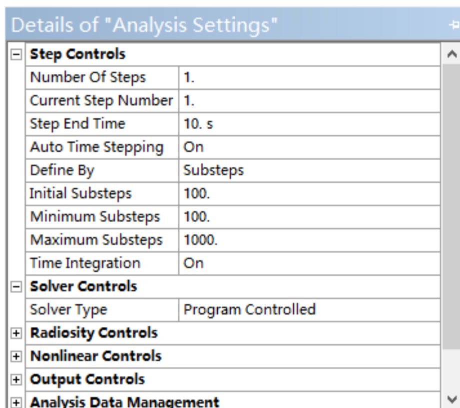


图 22−15　热流场

22.2.3　瞬态热分析

1. 设置分析选项

选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Transient Thermal（B5）”→“Analysis Settings”，修改“Step Controls”中的参数，如图 22−16 所示。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	10. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	100.
Minimum Substeps	100.
Maximum Substeps	1000.
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Radiosity Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

图 22−16　设置瞬态分析选项

2. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static-state Thermal（B5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Temperature”选项。

3）选择“Temperature”，在其细节窗口中设置“Magnitude”为“Tabular Data”，然后选择两个体的内表面，再单击“Geometry”下的“Apply”按钮确认。

4）在表格窗口中设置温度数据如图 22-17 所示。

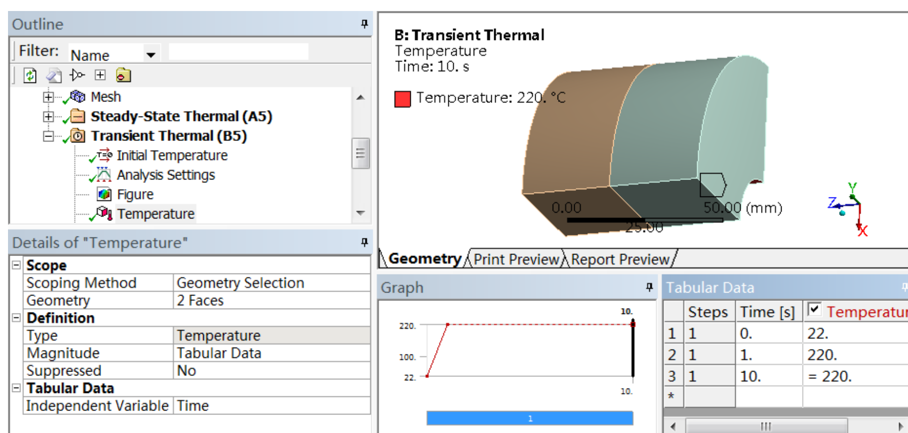


图 22-17　温度载荷

5）选择 Environment 工具栏中的“Convection”，此时在树结构图中会出现“Convection”选项。

6）选择“Convection”，在其细节窗口中设置“Film Coefficient”为“Tabular Data”，然后选择两个体的外表面，再单击“Geometry”下的“Apply”按钮确认。

7）在表格窗口中设置对流数据如图 22-18 所示。

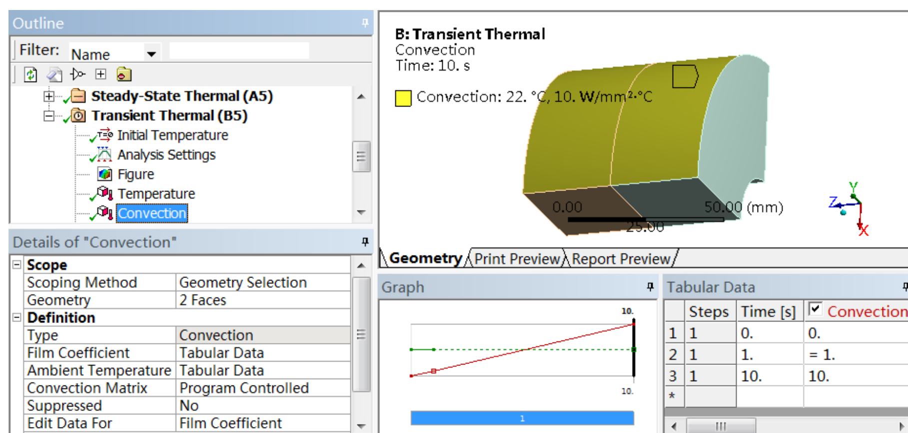


图 22-18　对流载荷

3. 求解

在 Outline 树结构图中的“Transient Thermal（B5）”选项右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

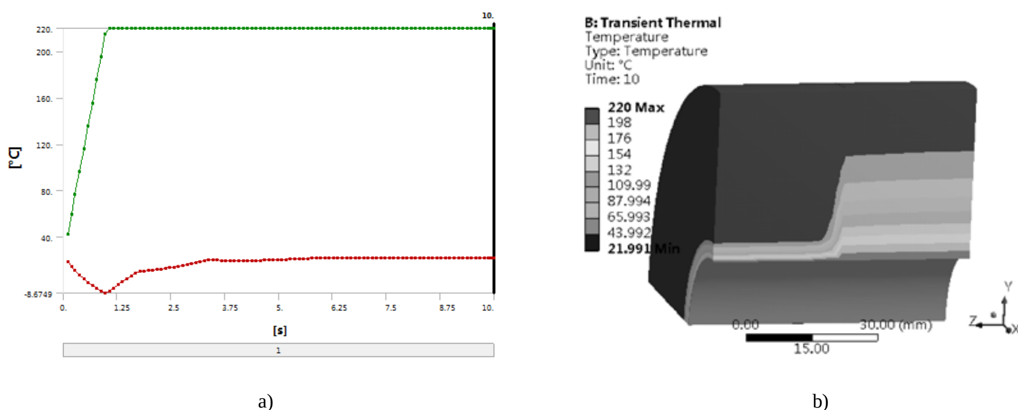
4. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Thermal”→“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Temperature”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Temperature”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体温度的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Temperature”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的温度结果如图 22-19 所示。



a) b)

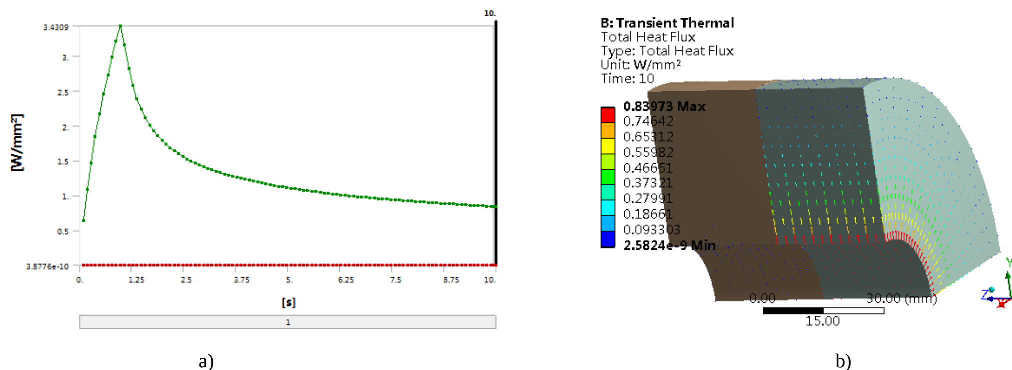
图 22-19 温度结果

a) 极值温度的变化曲线 b) 10s 时的温度场

5）选择 Solution 工具栏中的“Thermal”→“Total Heat Flux”，此时在树结构图中会出现“Total Heat Flux”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Total Heat Flux”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体热流的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Total Heat Flux”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的热流结果如图 22-20 所示。



a) b)

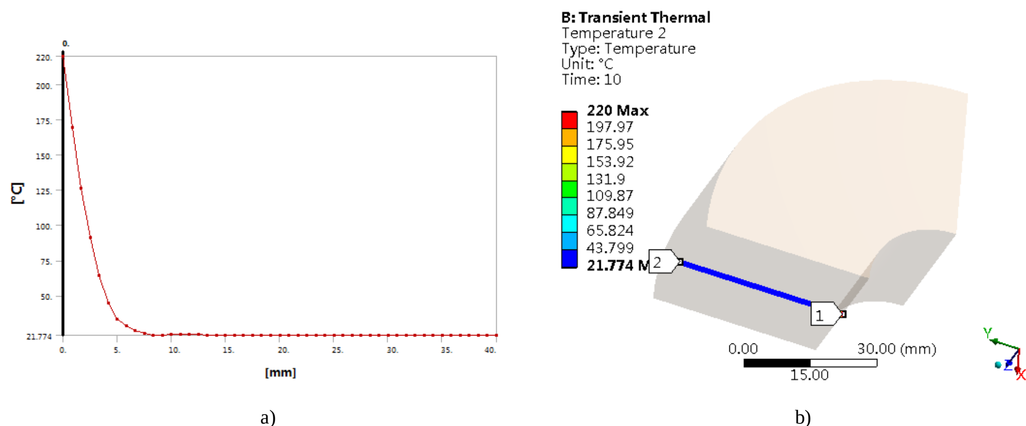
图 22-20 热流结果

a) 热流变化曲线 b) 10s 时的热流场

8）选择 Solution 工具栏中的“Thermal”→“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Temperature”选项。

9）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Temperature”细节窗口中“Scope Method”选项下“Path”，设置“Path”后的内容为“Path”，此时添加路径温度图。

10）在 Outline 树结构图中的“Temperature”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 Path 温度结果如图 22-21 所示。



a) b)

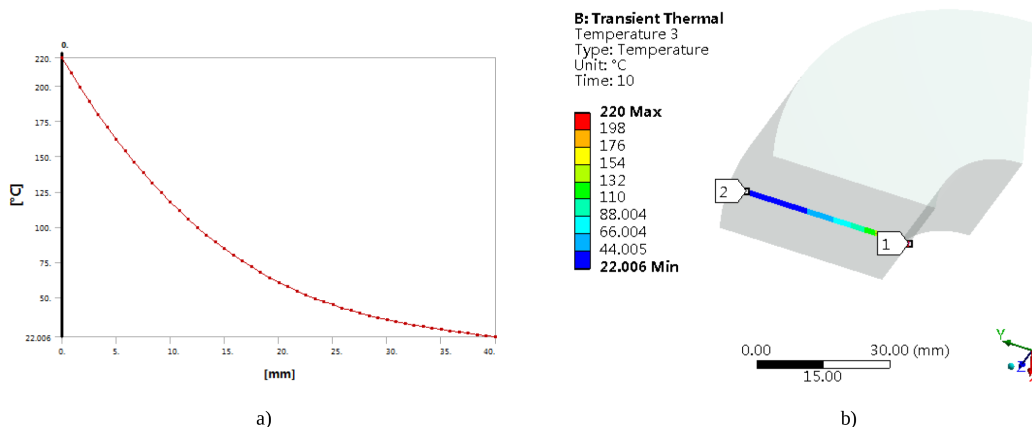
图 22-21 Path 温度结果

a) 温度分布曲线 b) 温度分布图

11）选择 Solution 工具栏中的“Thermal”→“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Temperature”选项。

12）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Temperature”细节窗口中“Scope Method”选项下“Path”，设置“Path”后的内容为“Path 2”，此时添加路径 2 温度图。

13）在 Outline 树结构图中的“Temperature”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 Path2 温度结果如图 22-22 所示。



a) b)

图 22-22 Path 2 温度结果

a) 温度分布曲线 b) 温度分布图

5. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 22-23 所示。

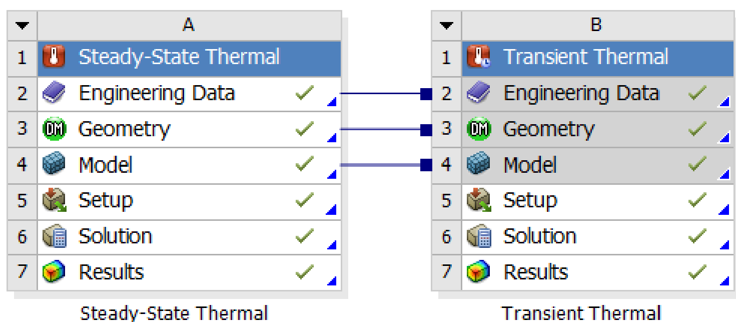


图 22-23 完成分析的项目工程图

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

22.3 本章小结

本章介绍了 ANSYS Workbench 热分析实现的基本知识，包括热分析使用的物理量及其单位、传热类型以及热分析的理论基础,并简单介绍了稳态热分析和瞬态热分析的分析过程。热分析在结构分析中有很重要的地位，在机械、热动、核电等领域有着极其重要的应用。在本章的基础上，希望读者多参考有关书籍和帮助文档来获得更多有关知识。



第 23 章　流 场 分 析

ANSYS Workbench 中集成了流场分析的功能，这使得在其中进行以流场分析为基础的工程分析的过程变得简单。本章将介绍使用 ANSYS Workbench 的 CFX 进行流场分析的基础知识和操作流程。

学习目标：

➢ 理解进行流场分析的步骤。

➢ 练习使用 ANSYS Workbench 进行流场分析。

23.1　流场分析基础

23.1.1　CFX 流场分析流程

进行 CFX 流场分析操作的基本过程包括：

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）定义连接。

6）划分网格。

7）设置求解控制选项。

8）定义物理条件。

9）CFX 求解。

10）CFX 后处理。

11）保存并退出。

大多数的基本步骤与其他分析无差别，但 CFX 流场分析并非在 Mechanical 中进行，而是通过 CFX 应用进行的。下面介绍与 CFX 应用有关的分析流程。

23.1.2　物理条件定义

物理条件定义在 CFX-Pre 中进行，步骤包括：

1）导入网格。

2）定义计算域。

3）创建计算域的边界条件。

4）设置求解控制条件。

下面介绍以上几个过程。

1．导入网格

导入网格的方式包括：

1）使用 ANSYS Workbench 提供的 Fluid Flow 系统的集成功能直接导入。

2）在 CFX-Pre 中选择“File”→“Import”→“Mesh”导入。

2．定义计算域

CFX-Pre 使用计算域的概念来定义流体/固体区域、计算类型和流体/固体属性。计算域中的流体方程和传热方程可以通过程序进行求解。

创建计算域的方法为：在 CFX-Pre 中选择“Insert”→“Domain”或直接单击工具栏中相应命令按钮。

进入定义的计算域后还要进行相应的设置，常见的设置包括：

- Basic Settings——设置计算域的位置和类型、流体、孔隙和固体等。
- Porosity Settings——在孔隙计算域中，设置气孔的属性。
- Fluid Models——在流体计算域中设置流体域的属性。
- Solid Models——在计算固体域中设置固体域的属性。

3．创建计算域的边界条件

创建计算域的边界条件的操作如下。

1）选择“Insert”→“Boundary”或单击工具栏中相应的命令按钮。

2）输入名称，单击“Apply”按钮。

需要对已创建的边界条件进行修改时，可以进行如下操作。

1）在树结构图中相应的边界条件对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Edit”，此时将出现边界条件的细节窗口。

2）在细节窗口中修改边界条件设置，单击“OK”按钮确认。

可以定义的边界条件种类包括：

- Inlet——流体入口。
- Outlet——流体出口。
- Wall——壁面。
- Symmetry——流体边界对称条件。
- Interface——流体与固体的界面。

4．设置求解控制条件

在 CFX-Pre 中设置可以控制 CFX 求解器在求解时采用的参数，主要的设置项如下。

- 基本设置——主要包括差分格式设置、收敛控制设置、收敛标准设置、逝去时间设置等。一般的求解模拟均在此设置。
- 方程分类设置——此项允许用户分别设置差分格式、收敛控制、收敛标准，根据不同求解要求设定它们在求解过程中的重要性。
- 高级选项设置——此项为部分特殊模型求解过程提供了专门的设置选项。

23.1.3 CFX 求解

在完成 CFX 前处理器的设置后，可通过双击 Workbench 中 CFX 系统中的“Solution”

项打开求解窗口（Define Run）。在求解窗口中需要进行的设置如下。

- Solve Input File——引入前处理写出的求解文件。
- Initial Values Specification——设置初始值文件，可通过初始设定，也可通过加载初始文件设定。
- Adaption Database——网格自适应数据库，用来导入网格自适应文件。
- Type of Run——设置计算类型，分为完整（Full）和分卷（Partitioner Only）两种。
- Parallel Environment——设置并行计算。
- Run Environment——设置计算时使用的文件夹。

完成求解器设置后，单击“Start Run”按钮即可启动计算。

23.1.4 CFX 后处理

CFX 后处理在 CFX-Post 应用中实现。在完成计算后，双击 CFX 系统中的“Results”项可以打开 CFX 后处理器。

CFX 的结果显示功能主要通过 Insert 菜单与相应的工具栏实现，可以绘制的结果图形包括：

- Vector——向量图。
- Contour——等值线云图。
- Streamline——流线图。
- Particle Track——粒子跟踪图。
- Volume Rendering——立体渲染。

可显示的内容包括：

- Pressure——压力场。
- Temperature——温度场。
- Velocity——流速场。

可指定的变量范围包括：

- Global——全局值。
- Local——局部值。
- User Specified——用户指定值。
- Value List——值列表。

23.2 流场分析示例

本节对使用 CFX 进行流场分析的操作流程进行示例。

23.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Fluid Flow（CFX）”选项，



即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 23-1 所示。

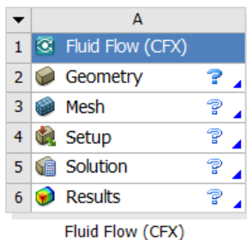


图 23-1 分析项目

2. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap24”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的?变为✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，就会进入 DM 界面，查看模型如图 23-2 所示。此时如果设计树中显示⚡，则表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

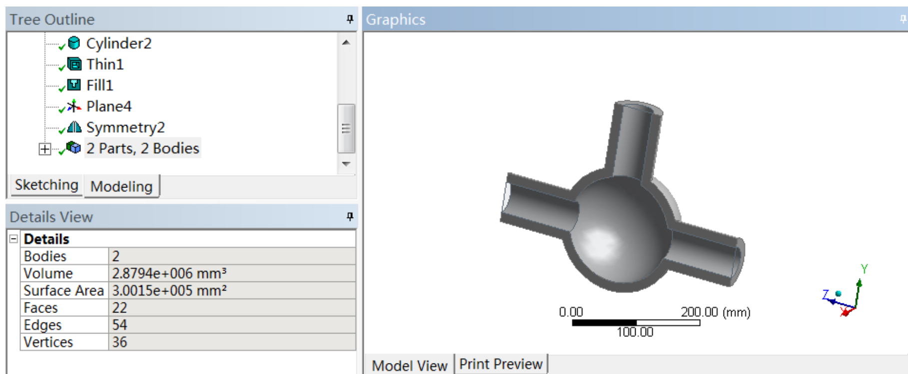


图 23-2 DM 模型

4）单击 Generate 按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

3. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 的 A3 栏中的“Model”项，进入 Mechanical 界面。导入的模型如图 23-3 所示。

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 1 个“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。另一个 Solid 为流体，也无需更改。

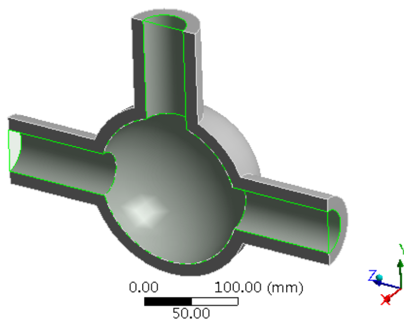


图 23-3 导入的几何模型

4. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中

的“Mesh”选项，此时可在 Details of “Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上右击，选择“Insert”→“Sizing”，然后选择内部流体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“3mm”。

3）在“Mesh”上右击，选择“Insert”→“Method”，然后选择待划分的所有体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，并设置细节窗口中的“Method”为“Hex Dominant Method”。

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 23–4 所示。

5. 设置集合

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Named Selections”，在工具栏中单击“Named Selection”，此时在树结构图中会出现“Selection”选项。

2）右击“Selection”选项，然后在弹出的快捷菜单中选择“Rename”，将其更名为“inlet_cold”。

3）选择位于模型中的左端面，如图 23–5 所示，然后在 inlet_cold 的细节窗口的“Geometry”中单击“Apply”按钮，此时创建的集合包含了的面，将用于设置冷水入口端。

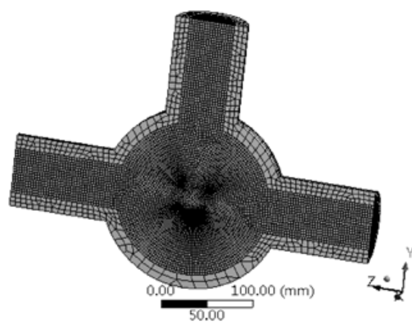


图 23–4　网格模型

4）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Named Selections”，在工具栏中单击“Named Selection”，此时在树结构图中会出现“Selection”选项。

5）右击“Selection”选项，然后在弹出的快捷菜单中选择“Rename”，将其更名为“inlet_hot”。

6）选择位于模型中的右端面，如图 23–6 所示，然后在 inlet_hot 的细节窗口的“Geometry”中单击“Apply”按钮，此时创建的集合包含了的面，将用于设置热水入口端。

7）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Named Selections”，在工具栏中单击“Named Selection”，此时在树结构图中会出现“Selection”选项。

8）右击“Selection”选项，然后在弹出的快捷菜单中选择“Rename”，将其更名为“outlet”。

9）选择位于模型中的面，如图 23–7 所示，然后在 outlet 的细节窗口的“Geometry”中单击“Apply”按钮，此时创建的集合包含了的面，将用于设置出口端。



图 23–5　冷水入口端



图 23–6　热水入口端



图 23–7　出口端

6. 退出 Mechanical

单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

7. 进入 CFX 环境

1）在流体分析项目上，右击“Mesh”，在弹出的快捷菜单中选择“Update”更新，把网格数据传递到 CFX 环境中。

2）在流体分析项目上，右击“Setup”，然后在弹出的快捷菜单中选择“Edit”，进入 CFX 工作环境。

8. 设置流体域和固体域

1）在树结构图上，右击默认域（Default Domain），在弹出的快捷菜单中选择“Delete”，将其删除。

2）创建流体区域。在工具栏上单击“Domain”按钮，在弹出的“Insert Domain”对话框中输入“fluid”，然后单击“OK”按钮确认。

3）进入 fluid 域的细节窗口，对基本选项进行设置，如图 23-8 所示，然后单击“OK”按钮确认。

4）创建流体区域。在工具栏上单击“Domain”按钮，在弹出的“Insert Domain”对话框中输入“solid”，然后单击“OK”按钮确认。

5）进入 fluid 域的细节窗口，对基本选项进行设置，如图 23-9 示，然后单击“OK”按钮确认。

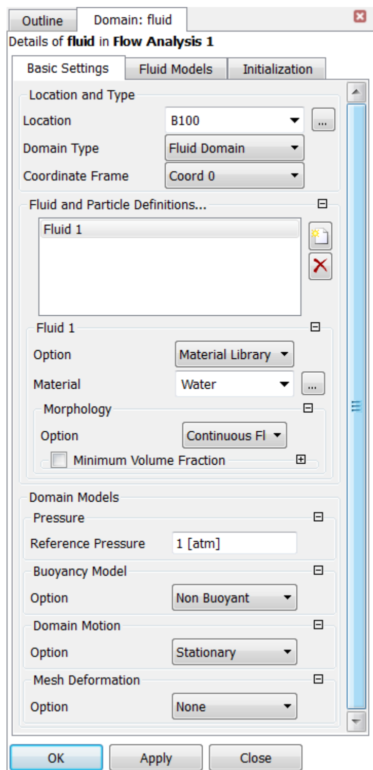


图 23-8　fluid 域设置

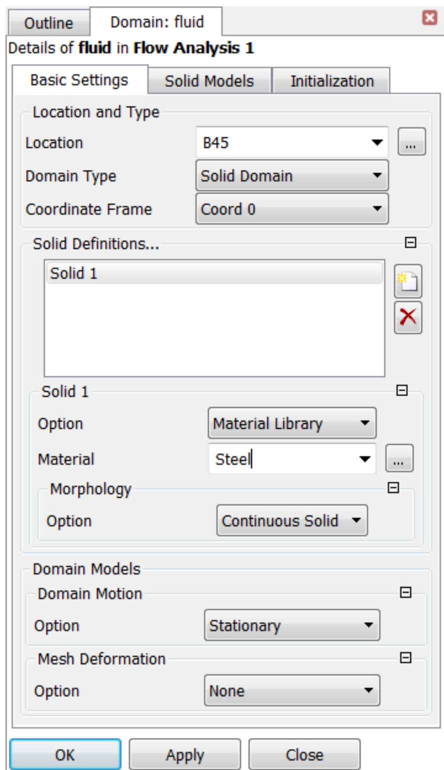


图 23-9　solid 域设置

9. 入口边界条件设置

1）在工具栏上单击“Boundary”按钮，然后选择“in Fluid”，在弹出的细节窗口中设置“Boundary Type”为“Inlet”，并修改“Location”为“inlet_cold”，如图 23−10 所示。

2）在“Boundary Details”选项卡中，设置“Mass and Momentum”下的“Option”为“Normal Speed”，“Normal Speed”的值为“5[ms^-1]”，并设置“Heat Transfer”的“Option”为“Static Temperature”，“Static Temperature”为“25[C]”，如图 23−11 所示。

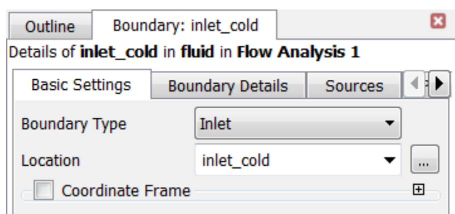


图 23−10 冷水入口端设置

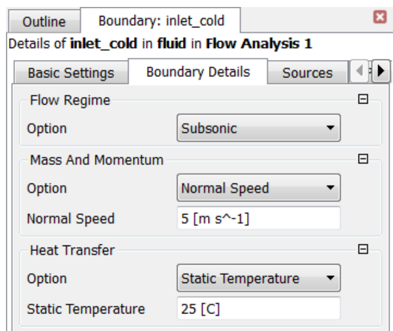


图 23−11 冷水入口端流体参数

3）在工具栏上单击“Boundary”按钮，然后选择“in Fluid”，在弹出的细节窗口中设置“Boundary Type”为“Inlet”，并修改“Location”为“inlet_hot”，如图 23−12 所示。

4）在“Boundary Details”选项卡中，设置“Mass and Momentum”下的“Option”为“Normal Speed”，“Normal Speed”的值为“5[ms^-1]”，并设置“Heat Transfer”的“Option”为“Static Temperature”，“Static Temperature”为“95[C]”，如图 23−13 所示，然后单击“OK”按钮。

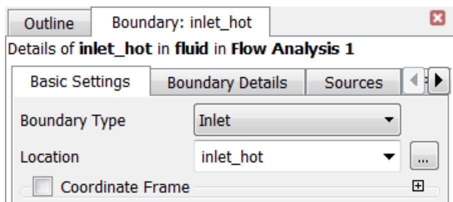


图 23−12 热水入口端设置

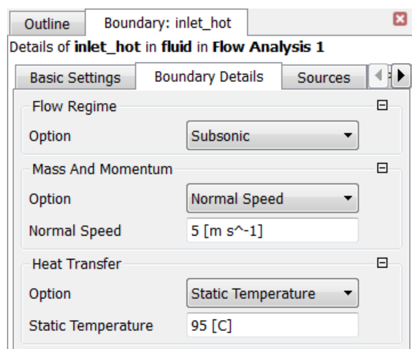


图 23−13 热水入口端流体参数

10. 出口边界条件设置

1）在工具栏上单击“Boundary”按钮，然后选择“in Fluid”，在弹出的细节窗口中设置“Boundary Type”为“Outlet”，并修改“Location”为“outlet”，如图 23−14 所示。

2）在“Boundary Details”选项卡中，设置“Mass and Momentum”下的“Option”为“Average Static Pressure”，“Relative Pressure”的值为“1.9[MPa]”，如图 23−15 所示，然后单击“OK”按钮。

11. 壁面设置

1）在 solid 域中，双击“soild Default”，在弹出的细节窗口中设置“Boundary Type”为



“Wall”，“Location”的值如图 23-16 所示。

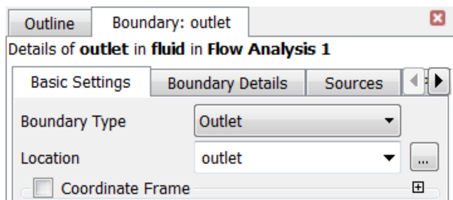


图 23-14　出口端设置

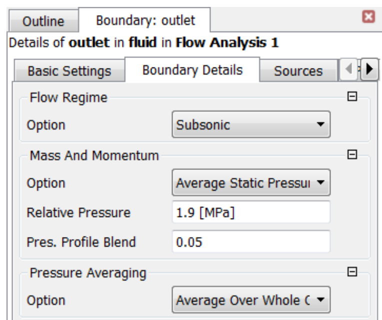


图 23-15　出口端流体参数

2）在“Boundary Details”选项卡中，设置“Heat Transfer”下的“Option”为“Heat Transfer Coefficient”，“Heat Trans.Coeff.”的值为“12[W m^-2 K^-1]”，“Outside Temperature”为“25[C]”，如图 23-17 所示，然后单击“OK”按钮。

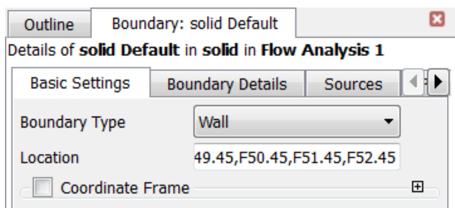


图 23-16　壁面设置

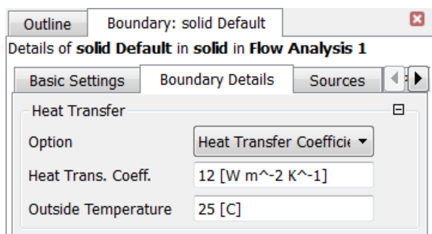


图 23-17　壁面参数

12. 求解控制

1）前文中边界条件的设置效果如图 23-18 所示，此时可以准备求解。

2）在树结构图中，右击“Solver Control”，在弹出的快捷菜单中选择“Edit”，进入求解控制窗口，其设置均为默认，然后单击“OK”按钮确认，如图 23-19 所示。

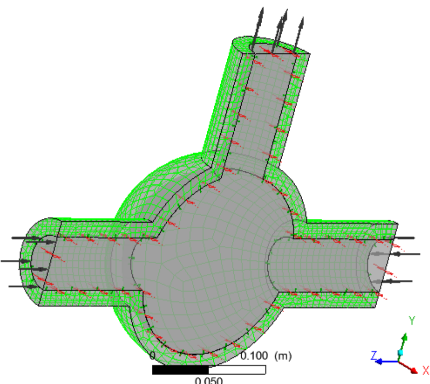


图 23-18　边界条件设置效果

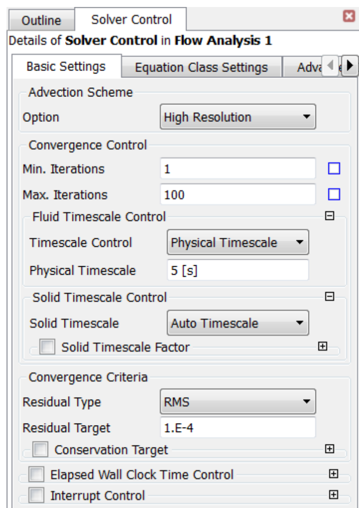


图 23-19　求解控制设置

23.2.2 求解

1）单击“File”→“Close CFX-Pre”，退出前处理环境，返回到 Workbench 主界面。

2）在流体分析项目上，右击“Solution”，并在弹出的快捷菜单中选择“Edit”，当 Solver Manager 弹出时，单击“Start Run”运行求解。

3）求解完成后，单击“File”→“Close CFX-Solver Manager”，返回到 Workbench 主界面。

23.2.3 后处理

1）在流体分析项目上，右击“Result”，在弹出的快捷菜单中选择“Edit”，进入 CFD-Post 环境中。

2）单击工具栏中的“Contour”按钮，在弹出的窗口中单击“OK”按钮创建“Contour 1”对象。在细节窗口设置参数如图 23-20 所示，单击“Apply”按钮确认。得到的压力分布图如图 23-21 所示。

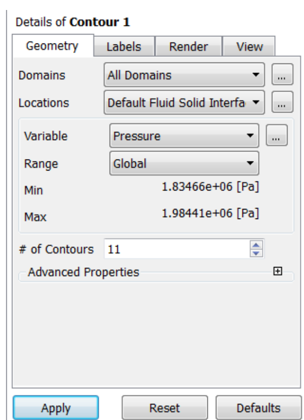


图 23-20　压力分布查看设置

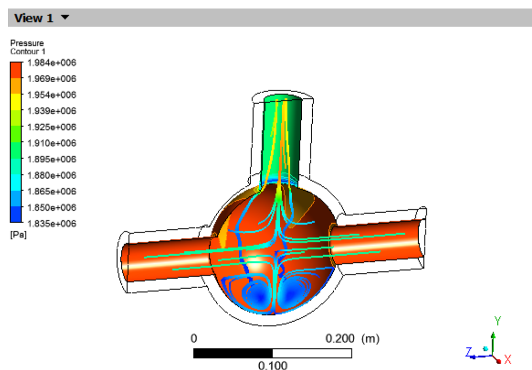


图 23-21　压力分布图

3）单击工具栏中的“Contour”按钮，在弹出的窗口中单击“OK”按钮，创建“Contour 2”对象。在细节窗口设置参数如图 23-22 所示，然后单击“Apply”按钮确认。得到的温度场等值线图如图 23-23 所示。

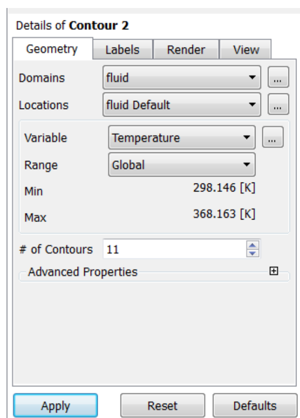


图 23-22　温度场查看设置

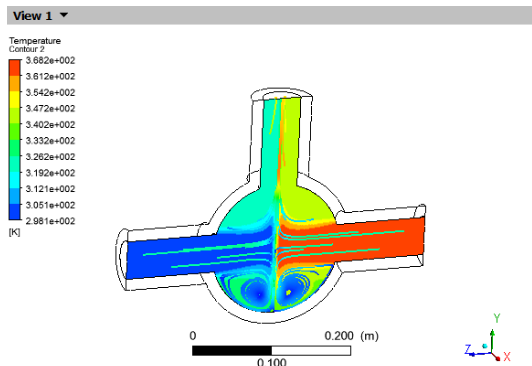


图 23-23　温度场等值线图

4）单击工具栏中的“Streamline”按钮，在弹出的窗口中单击“OK”按钮创建“Streamline 1”对象。在细节窗口设置参数如图 23-24 所示，单击“Apply”按钮确认。得到的流线图如图 23-25 所示。

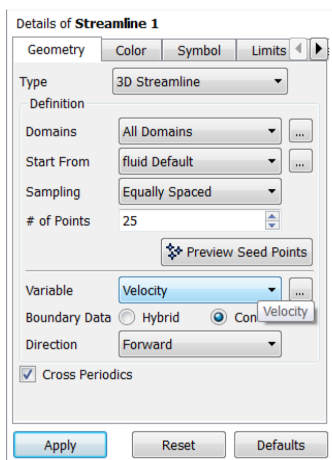


图 23-24　流线查看设置

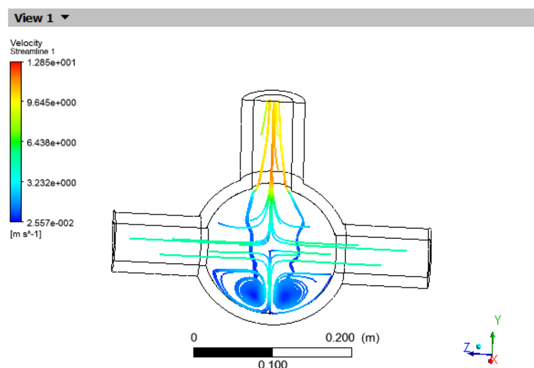


图 23-25　流线图

23.3　流场致温度场分析示例

23.3.1　前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Fluid Flow（CFX）”选项，即可在项目管理区创建分析项目 A。

3）在工具箱中的“Analysis System”→“Static-State Thermal”上按住鼠标左键拖曳到项目管理区中，当项目 A 的“Solution”项红色高亮显示时，放开鼠标创建项目 B。此时相关联项的数据可共享，如图 23-26 所示。

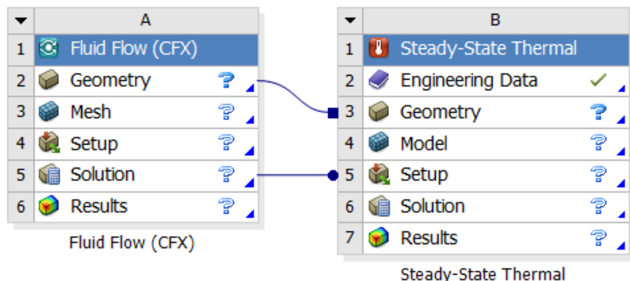


图 23-26　分析项目

2. 流场分析（项目 A）

见 23.2 节。

3. 定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，得到的分析项目树结构图如图 23-27 所示。在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。

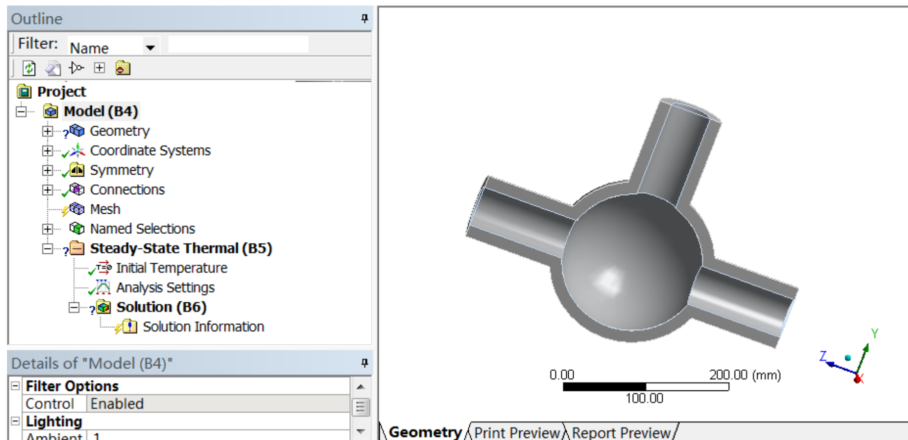


图 23-27　分析项目树结构图

2）在“Geometry”下找到第 2 个“Solid”，右击，在弹出的快捷菜单中选择“Suppresss”，得到的热模型如图 23-28 所示。

3）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料。

4）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中去。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在“Mesh”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Sizing”，然后选择体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“5mm”。

3）在“Mesh”上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择“Insert”→“Method”，然后选择待划分的体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，并设置细节窗口中的

“Method”为“Hex Dominant Method”。

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 23-29 所示。

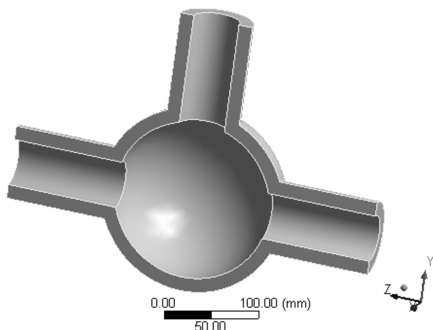


图 23-28　热分析模型

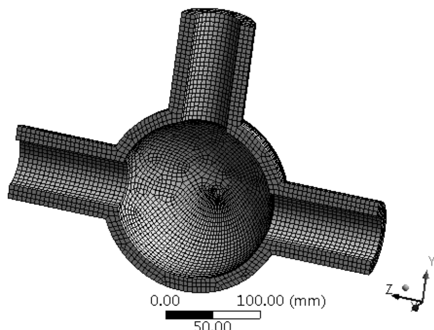


图 23-29　网格模型

6. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static-state Thermal（B5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Imported Loads”→“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Imported Temperature”选项。

3）选择内壁的 4 个面，并在 Imported Temperature 细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，导入的温度载荷如图 23-30 所示。

4）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static-state Thermal（B5）”选项，查看边界条件示意图，如图 23-31 所示。

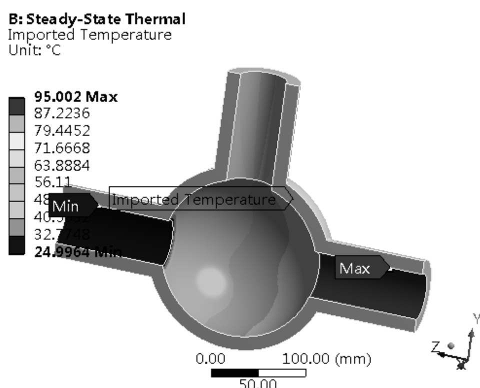


图 23-30　导入的温度载荷

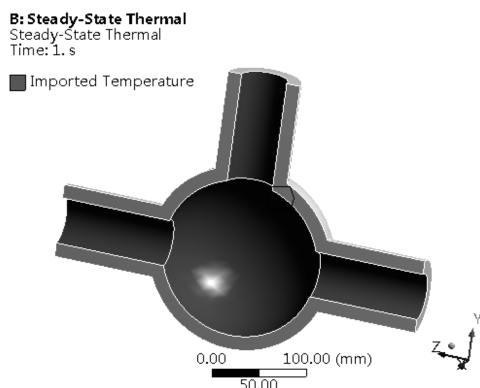


图 23-31　边界条件示意图

23.3.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Static-state Thermal（B5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解。当求解完成后进度条就会自动消

失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

23.3.3 后处理

1. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（B6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Thermal”→“Temperature”，此时在树结构图中会出现“Temperature”选项。

3）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Temperature”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体温度的等值线云图。

4）在 Outline 树结构图中的“Temperature”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的整体温度场如图 23-32 所示。

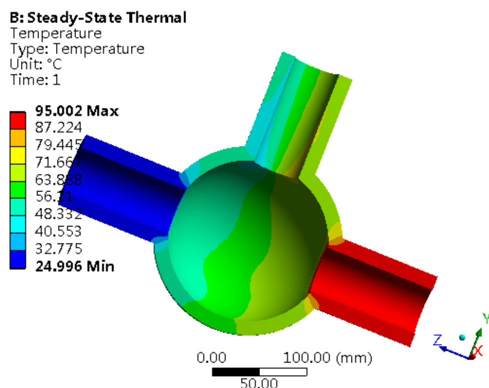


图 23-32 整体温度场

2. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。此时主界面的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 23-33 所示。

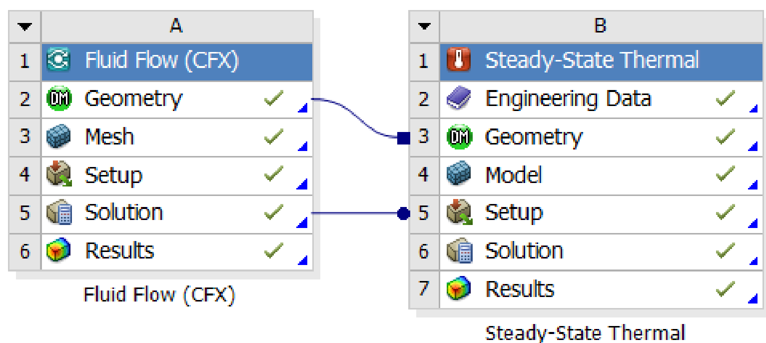


图 23-33 已完成的分析项目

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的

文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

23.4 本章小结

本章介绍了在 ANSYS 流体动力学 CFX 模块中进行流场分析的操作流程。CFX 流场分析涉及的知识面广、内容深奥，本章暂时没有设置太多内容，仅对软件操作过程进行了说明。在本章的第二个示例中，将流场中的温度导入到固体结构中，进行流场导致的温度场分析，这样的方式可以使流场分析结果广泛地应用到结构分析中去。



第 24 章 静磁场分析

ANSYS Workbench 17.0 提供了静磁场分析的功能，通过 Mechanical 应用进行分析计算。静磁场存在于很多场合，只要存在永磁体或存在电流，静磁场就存在。本章介绍静磁场分析在 ANSYS Workbench 17.0 中的操作过程。

学习目标：

- 理解进行静磁场分析的步骤。
- 练习使用 ANSYS Workbench 进行静磁场分析。

24.1 静磁场分析基础

24.1.1 静磁场分析应用

在静磁场分析中，用户可以创建各种物理区域来代表铁心、空气、永磁体和线圈，组成分析所需的环境，进而通过求解获得分析结果。典型的静磁场分析应用如下。

1）电力机械。

2）变压器。

3）感应加热。

4）螺线管执行器。

5）高场磁体。

6）无损检测。

7）电磁扰动。

8）医疗和地质仪器。

24.1.2 静磁场分析过程

静磁场的分析过程如下。

1）创建分析项目。

2）定义材料数据。

3）添加几何模型。

4）定义零件行为。

5）划分网格。

6）设置分析选项。

7）定义初始条件。

8）定义边界条件。

9）求解。

10）查看结果。

11）保存并退出。

需要注意的事项包括：

1）分析的类型必须为三维分析。

2）静磁场分析中所使用的几何模型必须是一个多体零部件，通过在 DM 中组合所有的零部件为一个零部件的方式可以得到。

3）磁场仿真需要的空气环境在建模时必须考虑，并且需要作为多体零部件的一部分，共同进行分析。

24.2 静磁场分析示例

本节通过示例来对静磁场分析的过程进行讲解。

24.2.1 前处理

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 中的“Analysis System”→“Magnetostatic”选项，在项目管理区创建分析项目 A，如图 24-1 所示。

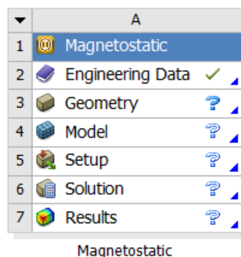


图 24-1 分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 中的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入如图 24-2 所示的工程数据界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

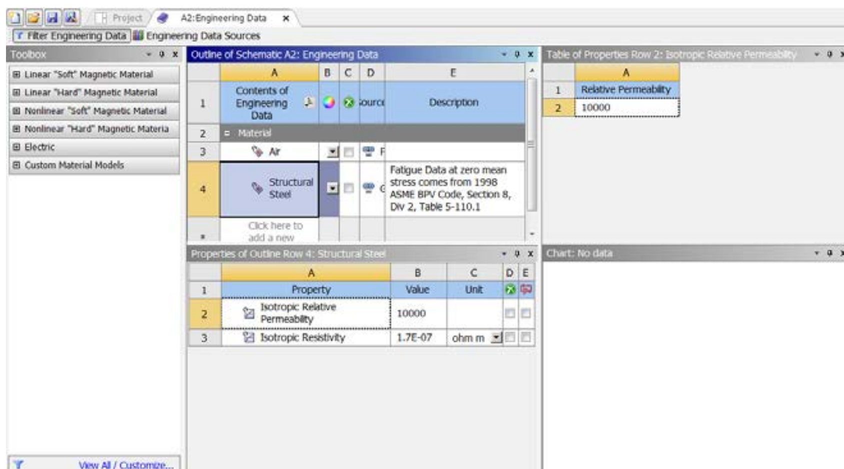


图 24-2 工程数据界面

2）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，此时原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 窗口将出现，如图 24-3 所示。

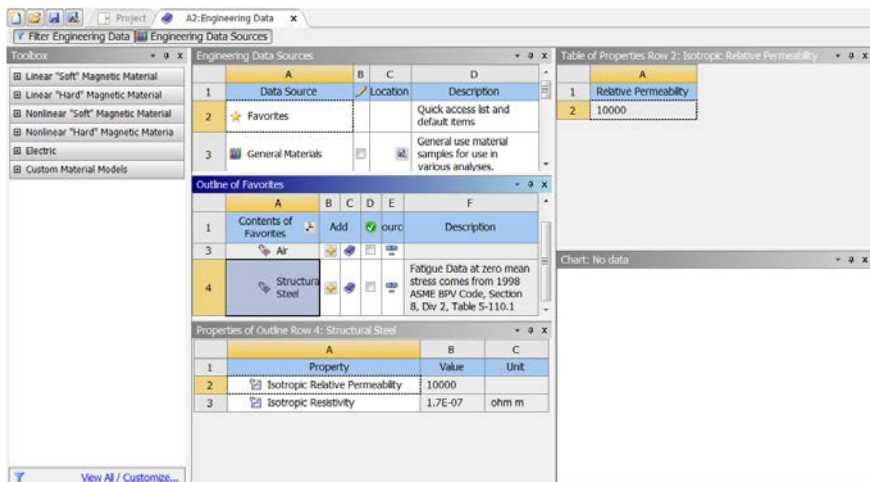


图 24-3　工程数据库界面

3）单击 Engineering Data Sources 窗口中的“General Materials”，此时 Outline 窗口显示为 Outline of General Material。

4）在 Outline of General Material 窗口中，选择“Copper Alloy”并单击后面的“添加”按钮，如图 24-4 所示。

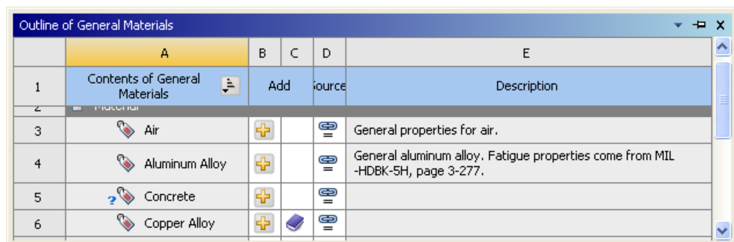


图 24-4　添加 Copper Alloy 材料

5）在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择“Engineering Data Sources”，返回到初始界面。此时 Outline of Schematic A2 中显示添加的“Copper Alloy”。

6）在 Outline of Schematic A2 中最后一行的第一列中单击，然后输入“Magnet Material”，得到的材料表如图 24-5 所示。

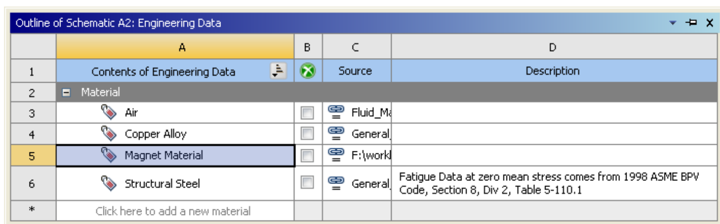


图 24-5　添加 Magnet Material

7）选择 Properties of Outline Row 5: Magnet Material 窗口，然后在 Toolbox 中选择“Linear“Hard”Magnetic Material”，双击其下的“Coercive Force & Residual Induction”。

8）填写 Properties of Outline Row 5: Magnet Material 窗口，如图 24-6 所示。

Properties of Outline Row 5: Magnet Material

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	⊟ Coercive Force & Residual Induction				
3	Coercive Force	8E+05	A m^-1		
4	Residual Induction	1.4	T		

图 24-6　硬磁材料特性

9）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap24”几何体文件。此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面，查看模型如图 24-7 所示。此时如果设计树中显示⚡，则表示需要生成模型，可进行步骤 4），否则可直接进入步骤 5）。

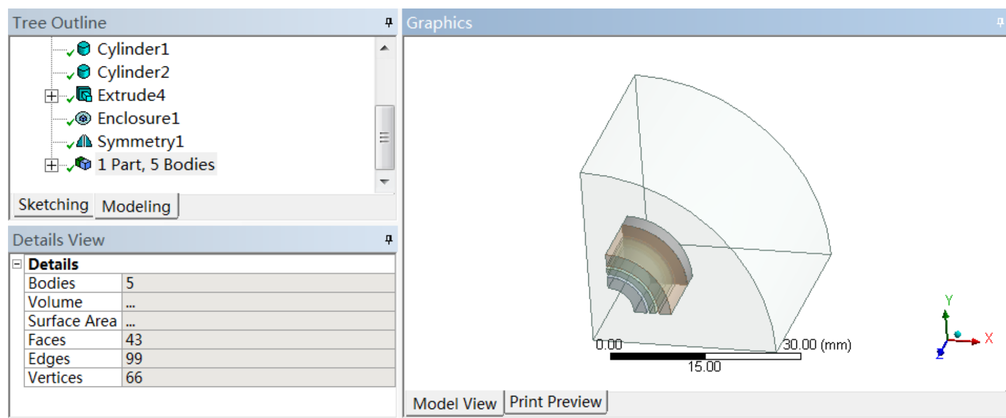


图 24-7　DM 模型

4）单击 Generate 按钮，即可显示生成的几何体。此时可在几何体上进行其他的操作，特别注意应将所有的零件放入到一个多体零件中去。本例无需进行操作。

5）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 的 A3 栏中的“Model”项，进入 Mechanical 界面，得到分析项目树结构图如图 24-8 所示，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。导入的模型如图 24-9 所示。

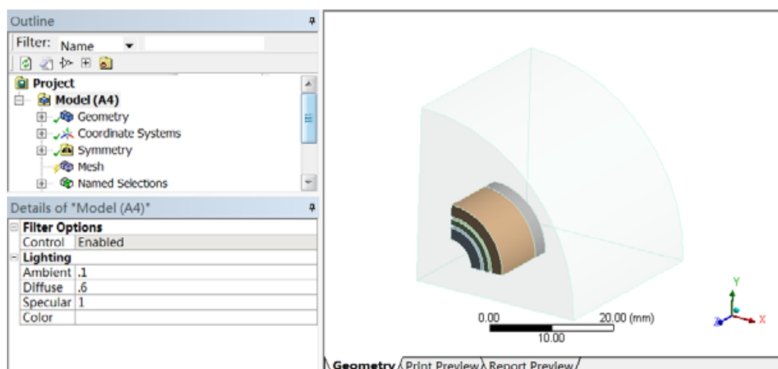


图 24-8 分析项目树结构图

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的最后 1 个“Solid”，右击，在弹出的快捷菜单中选择“Hide Body”。消隐后的模型如图 24-10 所示，在下文中，为使操作方便和结果清晰，除在施加边界条件时取消消隐外，其余均消隐。

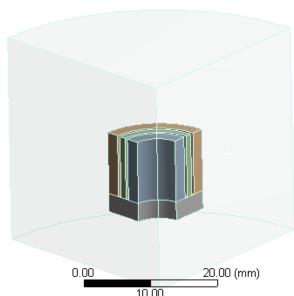


图 24-9 带空气的模型

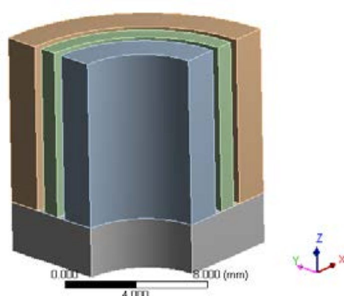


图 24-10 消隐空气的模型

3）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 1 个 Solid，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料，如图 24-11 所示。

4）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，然后选择“Magnet Material”即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✔，表示材料已经添加成功。

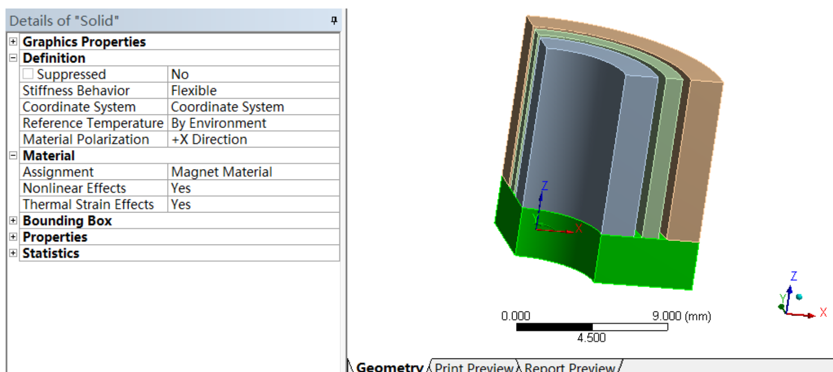


图 24-11 设置磁体

5）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的第 3 个“Solid”，此时即可在 Details of“Solid”细节窗口中给模型添加材料，如图 24−12 所示。

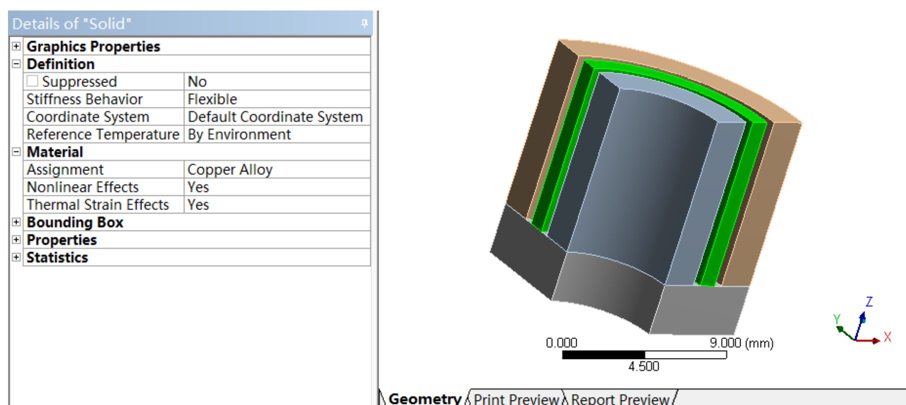


图 24−12　设置线圈导体

6）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择“Copper Alloy”即可将其添加到模型中去。此时树结构图“Geometry”前的**?**变为✔，表示材料已经添加成功。

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数中的“Relevance”为“10”。

2）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 24−13 所示。其中非空气部分网格如图 24−14 所示。

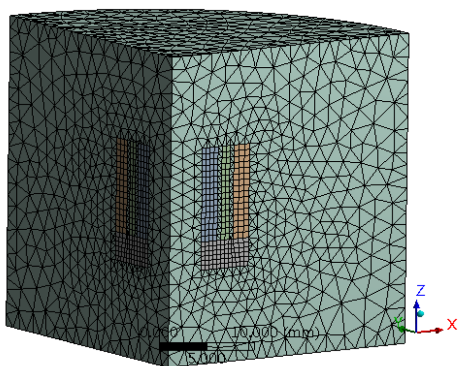


图 24−13　整体网格

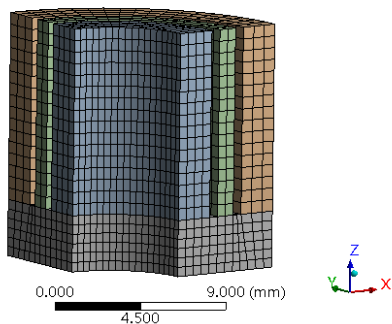


图 24−14　非空气部分网格

6. 设置边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Magnetostatic（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Magnetic Flux Parallel”，此时树结构图中出现

“Magnetic Flux Parallel”对象。

3）选择两个对称面（分别为 x=0 和 y=0）上的所有面区域，然后在 Magnetic Flux Parallel 对象的“Geometry”中单击“Apply”按钮。

4）选择 Environment 工具栏中的“Source Conduct”，此时树结构图中出现“Source Conduct”对象。

5）选择第 3 个 Solid 所在体，在 Source Conduct 对象的“Geometry”中单击“Apply”按钮。

6）选择 Environment 工具栏中的“Voltage”，此时树结构图中出现“Voltage”对象。

7）选择第 3 个 Solid 所在体 y 坐标为 0 的面，在 Voltage 对象的“Geometry”中单击“Apply”按钮。

8）选择 Environment 工具栏中的“Current”，此时树结构图中出现“Voltage”对象。

9）选择第 3 个 Solid 所在体 x 坐标为 0 的面，在 Curren 对象的“Geometry”中单击“Apply”按钮，然后设置“Magnitude”为“220mA”，如图 24-15 所示。

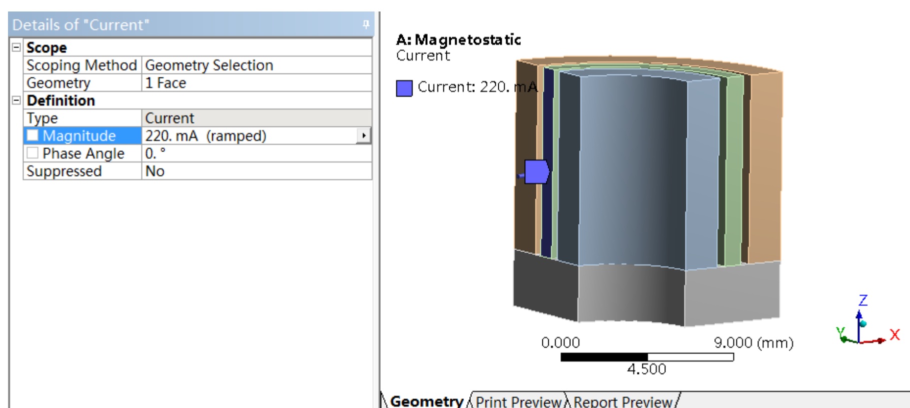


图 24-15 设置导体电流

10）最终得到的图形如图 24-16 所示。

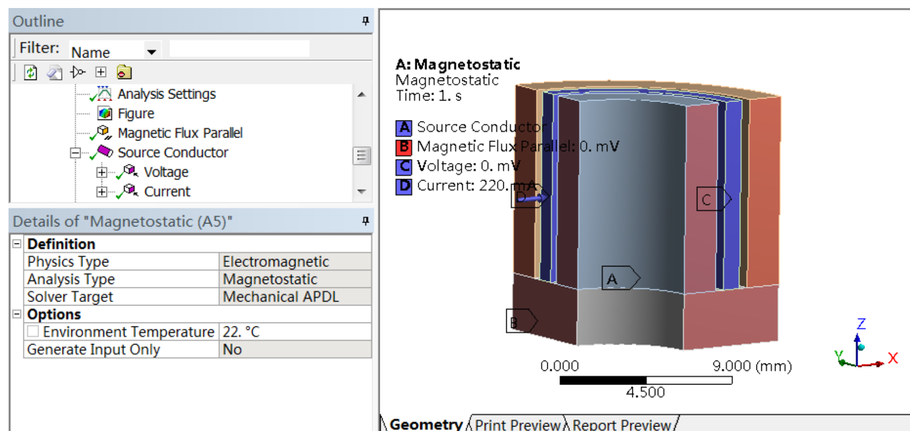


图 24-16 边界条件示意图

24.2.2 求解

在 Outline 树结构图中的“Magnetostatic（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解。当求解完成后进度条就会自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

24.2.3 后处理

1. 查看结果

1）在“Geometry”的第 5 个 Solid 上右击，在快捷菜单中选择“Hide Body”，消隐空气区域（如需要）。

2）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时会出现 Solution 工具栏。

3）选择 Solution 工具栏中的“Electromagnetic”→“Total Magnetic Flux Density”，此时在树结构图中会出现“Total Magnetic Flux Density”选项。

4）选择视图区域的零件，然后单击 Details of “Total Magnetic Flux Density”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体磁通量密度的等值线云图。

5）在 Outline 树结构图中的“Total Magnetic Flux Density”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的磁通量密度图形如图 24-17 所示。

6）选择 Solution 工具栏中的“Electromagnetic”→“Direction Force”，此时在树结构图中会出现“Direction Force”选项。

7）选择视图区域的第 3 个 Solid，然后单击 Details of “Direction Force”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加受力图。

8）在 Outline 树结构图中的“Direction Force”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的磁场力图形如图 24-18 所示。

9）选择 Solution 工具栏中的“Electromagnetic”→“Current Density”，此时在树结构图中会出现“Current Density”选项。

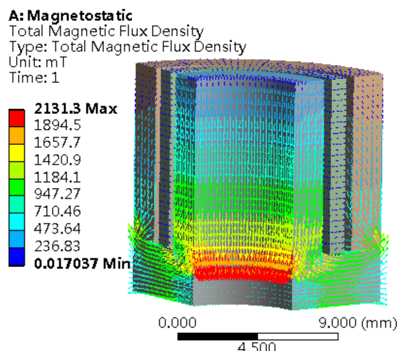


图 24-17 磁通量密度

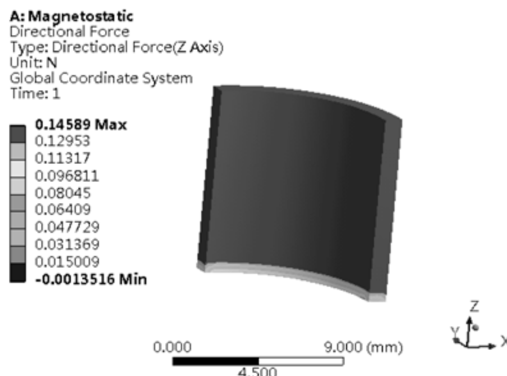


图 24-18 磁场力

10）选择视图区域的第 3 个 Solid，然后单击 Details of “Current Density”细节窗口中

“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加电流密度图。

11）在 Outline 树结构图中的“Current Density”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的电流密度图形如图 24-19 所示。

12）选择 Solution 工具栏中的“Probe”→“Force Summation”，此时在树结构图中会出现“Force Summation”选项。

13）选择视图区域的第 3 个 Solid，然后单击 Details of “Force Summation”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加总的受力。

14）在 Outline 树结构图中的“Force Summation”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的磁场力（合力）图形如图 24-20 所示。

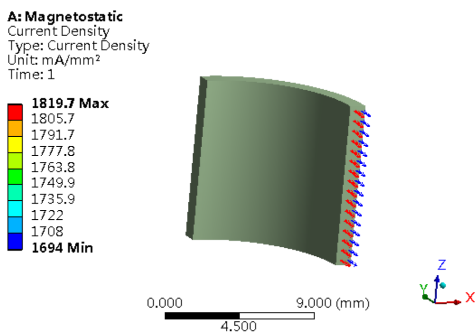


图 24-19 电流密度

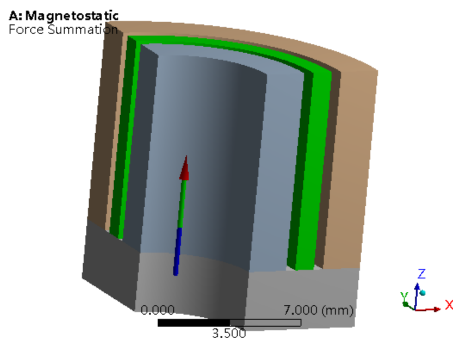


图 24-20 磁场力（合力）

2. 保存与退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 24-21 所示。

2）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

3）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

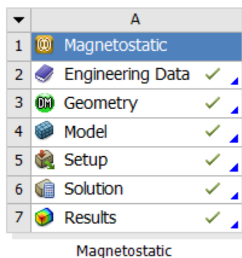


图 24-21 完成分析的项目工程图

24.3 本章小结

本章介绍了在 ANSYS Workbench 17.0 中静磁场分析的操作过程。静磁场分析的操作流程与力学分析的流程基本一致，这使得该类型分析操作十分简便。本章不涉及静磁场分析的有关理论，如有需要，可参考 ANSYS 帮助文档和有关书籍。

第 25 章　多物理场耦合分析

本章首先对多物理场的概念进行简要介绍，并通过典型案例详细讲解了电磁热耦合的操作步骤。

ANSYS Workbench 17.0 平台的优势在于可以很方便地进行多物理场耦合分析。通过简单的拖曳功能即可完成几何数据的共享及载荷的传递操作。

学习目标：

- 了解多物理场的基本概念及 Workbench 平台的多物理场分析功能。
- 熟练掌握电磁热耦合的操作方法及操作过程。

25.1　多物理场耦合分析概述

在自然界中存在 4 种场：位移场、电磁场、温度场和流场。这 4 种场之间是互相联系的，现实世界不存在纯粹的单场问题，遇到的所有物理场问题都是多物理场耦合的，只是受到硬件或者软件的限制，人为地将它们分成单场现象，以便各自进行分析。有时这种分离是可以接受的，但对于许多问题，这样计算将会得到错误结果。因此，在条件允许时，应该进行多物理场耦合分析。

多物理场耦合分析是考虑两个或两个以上工程学科（物理场）间相互作用的分析，例如，流体与机构的耦合分析（流固耦合），电磁与结构耦合分析，电磁与热耦合分析，热与结构耦合分析，电磁与流体耦合分析，流体与声学耦合分析，结构与声学耦合分析（振动声学）等。以流固耦合为例，流体流动的压力作用到结构上，结构产生变形，而结构的变形又影响了流体的流道，因此是相互作用的问题。

耦合分析总体来说分为两种：单向耦合与双向耦合。

单向耦合：以流固耦合分析为例，如果结构在流道中受到流体压力产生的变形很小，忽略掉也可满足工程计算的需要，则不需要将变形反馈给流体，这样的耦合称为单向耦合。

双向耦合：以流固耦合分析为例，如果结构在流道中受到的流体压力很大，或者即使压力很小也不能被忽略，则需要将结构变形反馈给流体，这样的耦合称为双向耦合。

ANSYS Workbench 还可与 ANSOFT Simplorer 软件集成在一起实现场路耦合计算。场路耦合计算适合于电动机、电力电子装置及系统、交直流传动、电源、电力系统、汽车部件、汽车电子系统、航空航天、船舶装置与控制系统、军事装备仿真等领域的分析。

在 ANSYS Workbench 中，多物理场耦合分析可以分析基本场之间的相互耦合，其应用场合包括以下几个方面。

1．流固耦合

汽车燃料喷射器、控制阀、风扇、水泵等；航天飞机机身、推进系统及其部件；可变形流动控制设备、生物医学上血流的导管及阀门、人造心脏瓣膜等；纸处理应用、一次性尿布制造过程。

2．压电应用

换能器、应变计、传感器等；传声器系统；喷墨打印机驱动系统。

3．热-电耦合

载流导体、汇流条等；电动机、发电机、变压器等；断路器、电容器、电抗器等；电子元件及电子系统；热-电冷却器。

4．MEMS 应用

MEMS 梳状驱动器（电-结构耦合）；MEMS 扭转谐振器（电-结构耦合）；MEMS 加速计（电-结构耦合）；MEMS 微泵（压电-流体耦合）；MEMS 热-机械执行器（热-电-结构耦合）；其他大量的 MEMS 装置等。

25.2 电磁热耦合分析示例

本节主要介绍ANSYS Workbench 17.0 的电磁场分析模块Maxwell的建模方法及求解过程，计算铝方板的热流分布。

25.2.1 问题描述

图 25-1 所示为铜线圈下面放置一个一侧开有方孔的铝方板，当铜线圈中有电流流过时，计算铝方板感应出来的温度和温度场的分布情况，当铝方板的 4 个边固定时，分析热应力的分布情况。

25.2.2 软件启动与保存

步骤 01 在 Windows XP 下单击“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”命令，如图 25-2 所示即可进入 ANSYS Workbench 主界面。

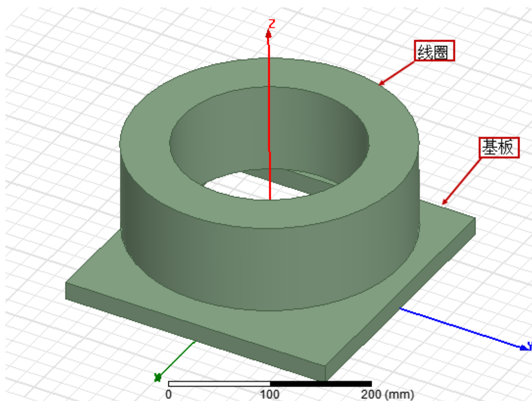


图 25-1 几何模型

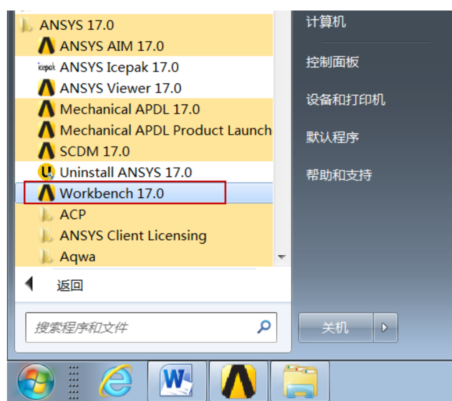


图 25-2 Workbench 启动方法

步骤02 进入 Workbench 后，单击工具栏中的“保存”按钮，将文件保存，如图 25-3 所示，然后单击 Getting Started 窗口右上角的“关闭”按钮将其关闭。

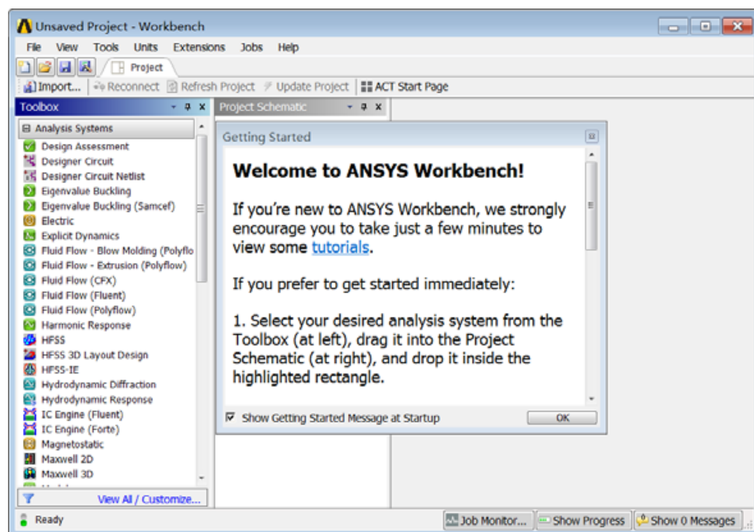


图 25-3 保存工程文档



本节示例需要用到ANSYS Electromagnetics程序包，请读者自行安装。

由于ANSYS Maxwell软件不支持保存路径中有中文字符，故在进行文档保存时，保存的路径不能含有中文字符，否则会发生错误。

25.2.3 建立电磁分析

步骤01 在 Toolbox（工具箱）的 Analysis Systems 中单击“Maxwell 3D”并按住左键不放将其拖曳到右侧的 Project Schematic 窗口中，此时即可创建一个如同 Excel 表格的工程分析流程表 A，如图 25-4 所示。

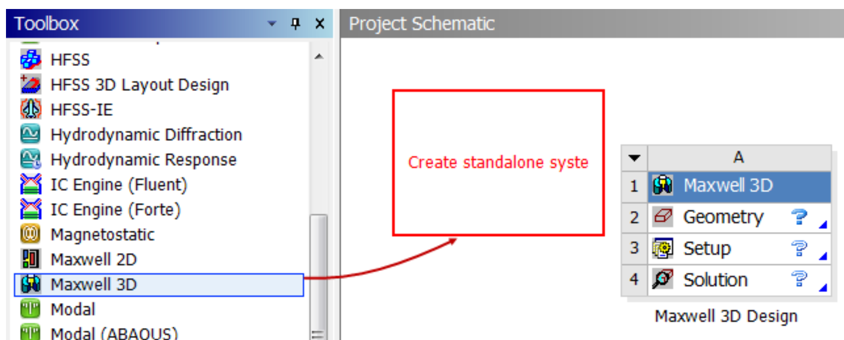


图 25-4 创建工程分析流程表

步骤02 打开 Maxwell 3D 软件。在 A2 栏“Geometry”中右击，在弹出的如图 25-5 所示的快捷菜单中选择“Edit”命令，启动 Maxwell 3D 软件，如图 25-6 所示。

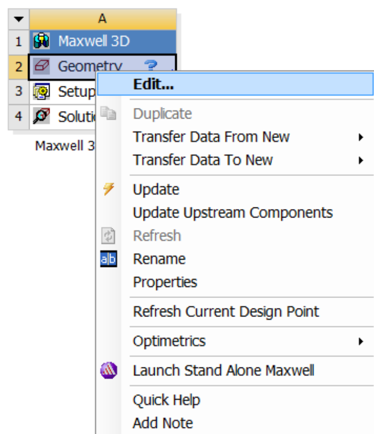


图 25-5 启动 Maxwell 3D

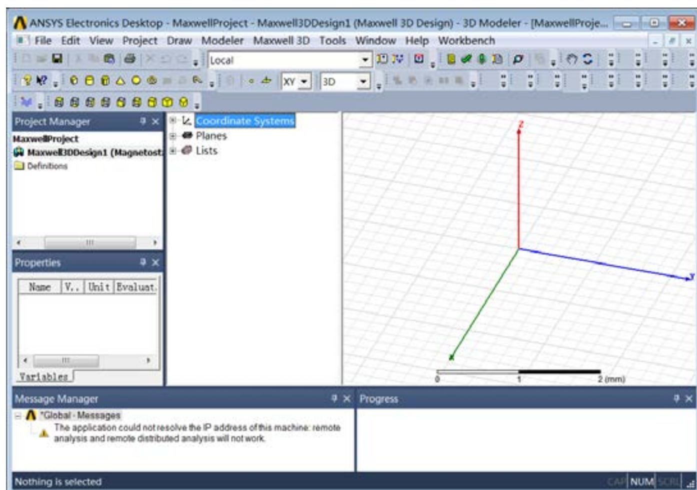


图 25-6 Maxwell 3D 界面



直接双击A2 栏“Geometry”也可启动Maxwell 3D软件。

步骤03 选择菜单栏中的“Maxwell 3D”→“Solution Type”命令，弹出如图 25-7 所示的“Solution Type”对话框，选择“Eddy Current”，并单击“OK”按钮。

步骤04 选择“Modeler”→“Units”，弹出如图 25-8 所示的“Set Model Units”对话框，将单位设置成“mm”，并单击“OK”按钮。

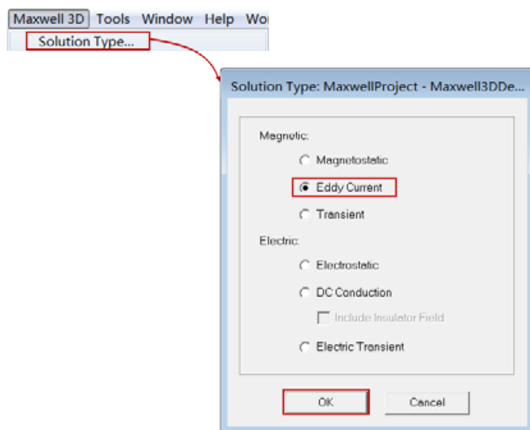


图 25-7 设置求解器类型

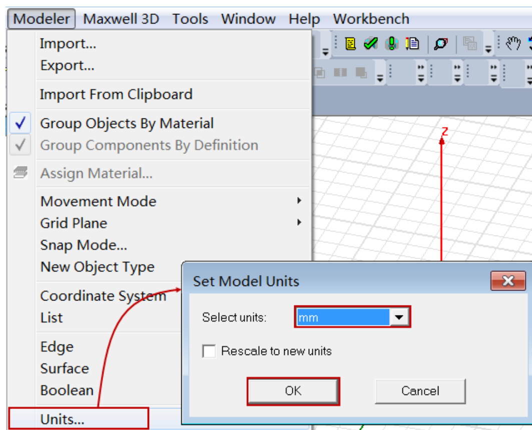


图 25-8 设置单位

25.2.4 建立几何模型

步骤01 单击工具栏中的“长方体”按钮 创建“长方体”。单击绘图区域的坐标原点，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中输入：“dX=300”“dY=300”



"dZ=20"，并按〈Enter〉键完成坐标输入，此时绘图区域生成如图 25-9 所示的长方体。

步骤 02 单击几何实体，使其处于加亮状态，此时左侧会弹出如图 25-10 所示的"属性"对话框。在对话框中的"Name"栏中将"Value"改成"Plate"，其余保持默认设置。

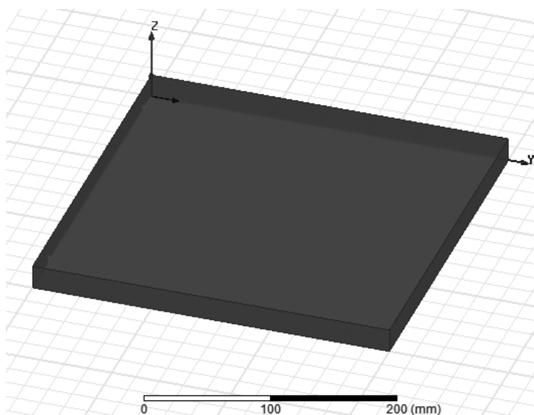


图 25-9　长方体

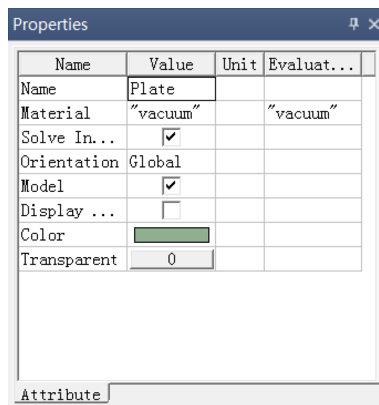


图 25-10　长方体命名

步骤 03 单击工具栏中的"长方体"按钮创建长方体。在绝对坐标栏中输入"X=20""Y=20""Z=0"，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中进行如下输入："dX=130""dY=130""dZ=20"，并按〈Enter〉键完成坐标输入。此时绘图区域生成如图 25-11 所示的长方体。

步骤 04 单击几何实体，使其处于加亮状态，此时左侧会弹出如图 25-12 所示的"属性"对话框。在对话框中的"Name"栏中将"Value"改成"Hole"，其余保持默认值。

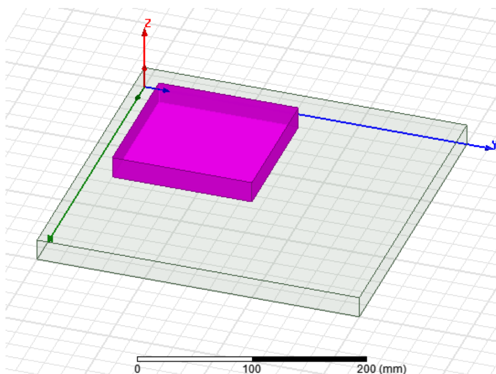


图 25-11　矩形

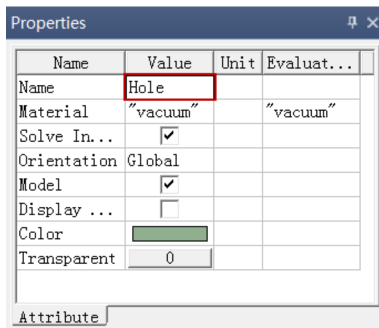


图 25-12　矩形命名

步骤 05 选中所有几何实体并单击工具栏中的"减运算"按钮，对两个几何实体进行减运算，此时弹出如图 25-13 所示的"Subtract"对话框，在"Blank Parts"中选中"Plate"实体，在"Tool Parts"中选中"Hole"，然后单击"OK"按钮完成减运

算。此时几何实体如图 25-14 所示。

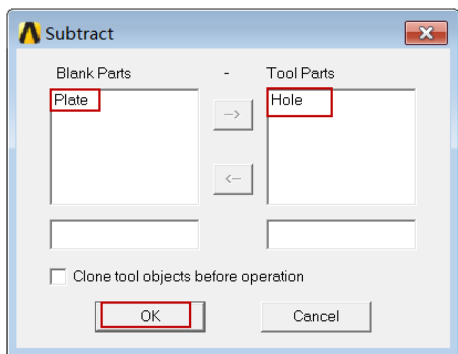


图 25-13 减运算

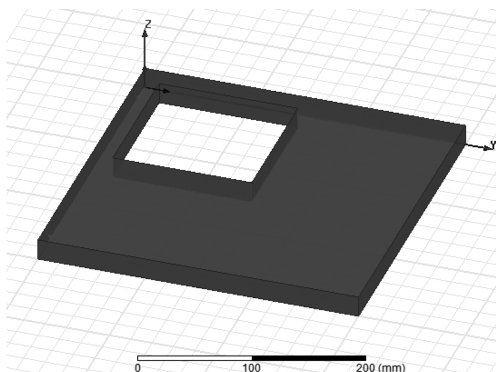


图 25-14 几何实体

步骤06 单击工具栏中的“圆柱体”按钮 创建圆柱。在绝对坐标栏中输入“X=150”“Y=150”“Z=50”，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中进行如下输入：“dX=100”“dY=0”“dZ=100”，并按〈Enter〉键完成坐标输入。此时绘图区域生成如图 25-15 所示的圆柱体。

步骤07 设置几何实体名称为“Coil_Hole”。

步骤08 单击“圆柱体”按钮创建另一个圆柱体。在坐标栏中依次输入“X=150”“Y=150”“Z=50”，在相对坐标栏中分别输入“dX=150”“dY=0”“dZ=100”，并按〈Enter〉键完成坐标输入，此时绘图区域生成如图 25-16 所示的圆柱体 2。

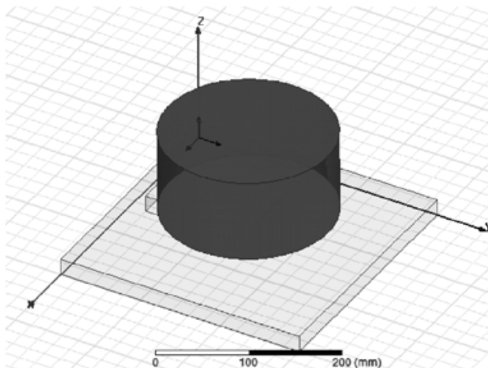


图 25-15 圆柱体

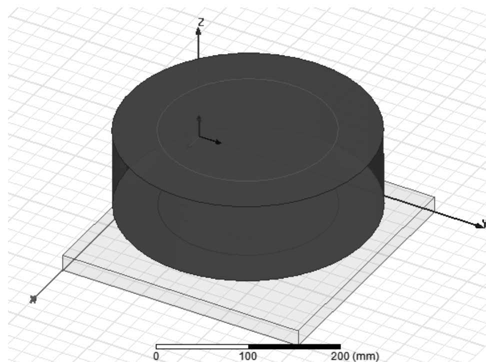


图 25-16 圆柱 2

步骤09 将名字设置为“Coil”。

步骤10 进行布尔运算，用外面的大圆柱体减去中间的小圆柱体，如图 25-17 所示。

步骤11 在圆柱体中心创建局部坐标系。单击工具栏中的“坐标系”按钮 ，在输入框中输入坐标系的原点为（150，150，0），在提示的 *X* 方向确保与广义坐标系的 *X* 轴平行，*Y* 轴与广义坐标系的 *Y* 轴平行即可，如图 25-18 所示，此时可以发现坐标系已经移动到圆柱体的轴上。



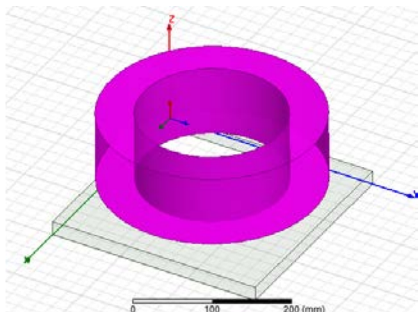


图 25-17　布尔运算

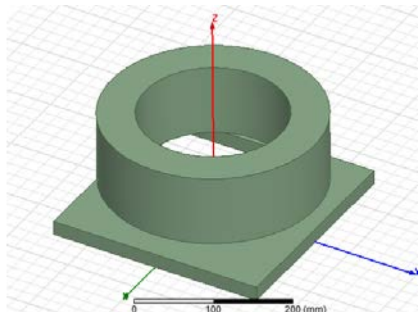


图 25-18　局部坐标系

步骤 12　先选择“Coil”几何实体，然后选择菜单“Modeler”→“Surface”→“Section”命令，弹出如图 25-19 所示的“Section”对话框。在对话框中选择“XZ”并单击“OK”按钮，此时几何实体生成两个截面，如图 25-20 所示。

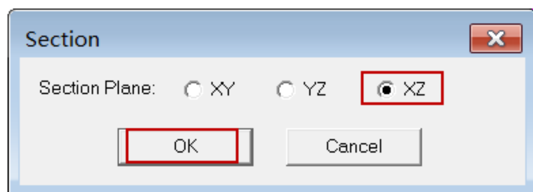


图 25-19　创建截面

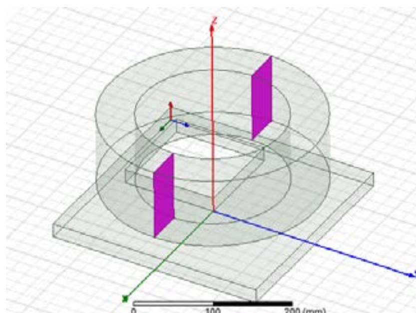


图 25-20　生成截面

步骤 13　保持两个截面处于加亮状态，选择菜单“Modeler”→“Boolean”→“Separate Bodies”命令，此时两个截面被分开。

步骤 14　右击“Coil_Section1_Separate1”命令，在弹出的快捷菜单中选择“Edit”→“Delete”命令，如图 25-21 所示。

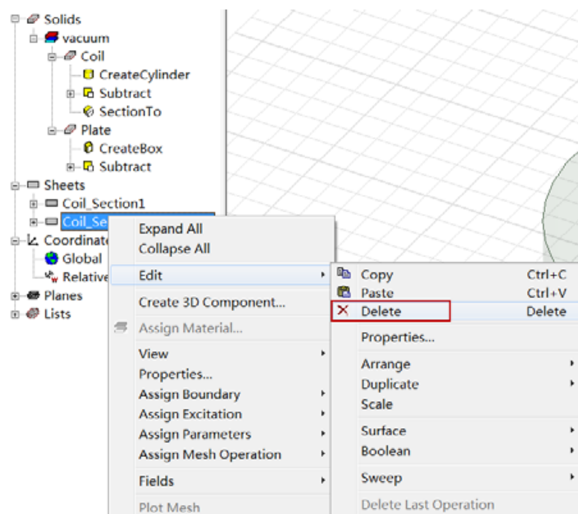


图 25-21　删除截面操作

25.2.5 设置求解域

单击工具栏中的 按钮，在弹出的如图 25-22 所示的“Region”对话框的“Value”栏中输入“300”，并单击“OK”按钮，此时将创建如图 25-23 所示的求解域。

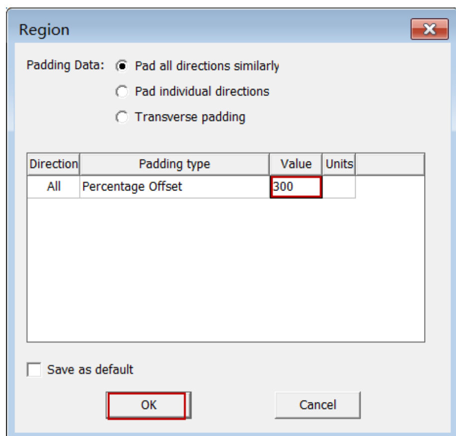


图 25-22 输入求解域大小

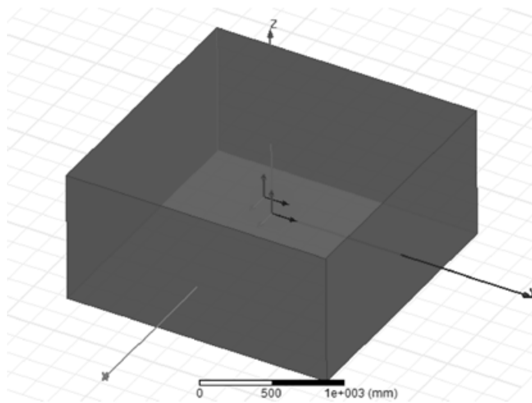


图 25-23 建立求解域

25.2.6 赋予材料属性

步骤 01 在模型树中选择相应的模型名，右击，然后在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material”命令，并在弹出的材料库中选择“copper”作为线圈的材料，如图 25-24 所示。

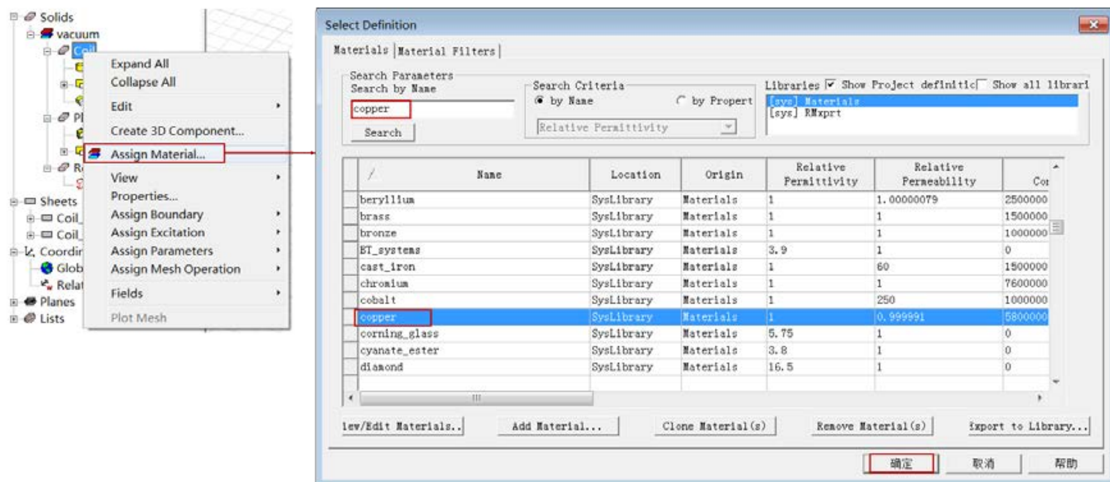


图 25-24 设置线圈材料为 copper

步骤 02 利用同样的方法设置底板的材料为铝，如图 25-25 所示。

步骤 03 求解域默认为真空（Vacuum）。

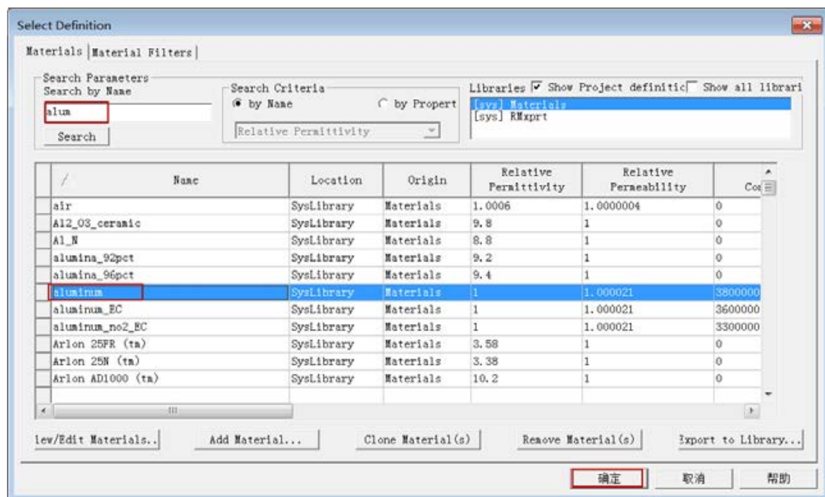


图 25-25　设置底板材料为 aluminum

25.2.7　添加激励

步骤 01　选择如图 25-26 所示的线圈截面，右击，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation”→“Current”命令，此时会弹出如图 25-27 所示的“Current Excitation”对话框。在该对话框的“Value”栏中输入“2742”，选中“Stranded”，然后单击“OK”按钮，完成参数的设置。

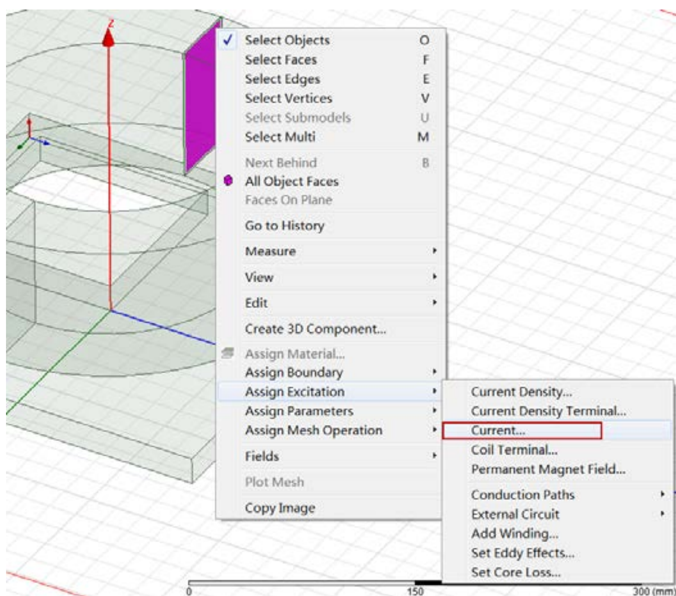


图 25-26　创建激励

步骤 02　选择菜单“Maxwell 3D”→“Excitations”→“Set Eddy Effect”命令，弹出如图 25-28 所示的“Set Eddy Effect”对话框，在对话框中选中“Plate”实体，并单击“OK”按钮。

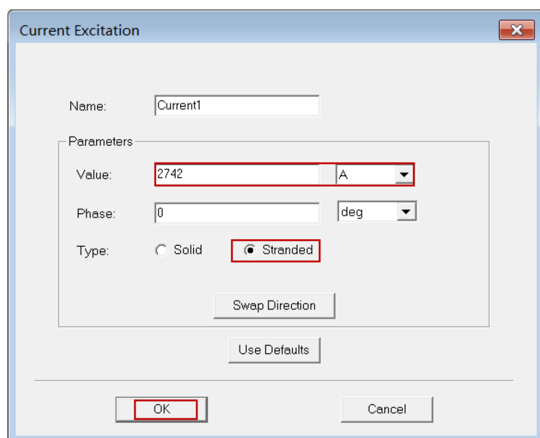


图 25-27 设置激励数值

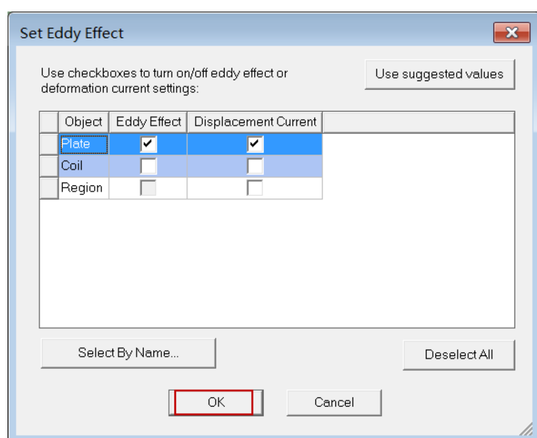


图 25-28 设置涡流效应

25.2.8 添加分析步

在 Project Manager 中的 Analysis 右击，在弹出的快捷菜单中选择如图 25-29 所示的“Add Solution Setup”命令，此时会弹出如图 25-30 所示的“Solve Setup”对话框：在“General”选项卡中设置“Percent Error”为“2”；在“Convergence”选项卡中设置“Refinement Per Pass”为“50”；在“Solve”选项卡中设置“Adaptive Frequency”为“200Hz”，然后单击“确定”按钮。

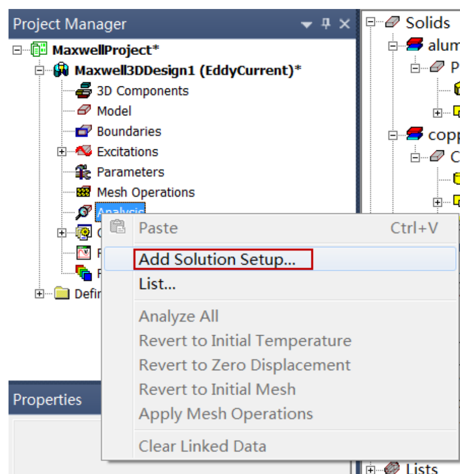


图 25-29 添加一个分析步

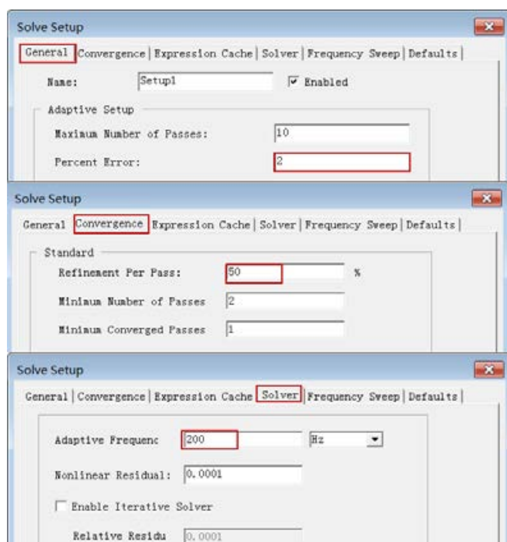


图 25-30 分析步参数设置

25.2.9 模型检查与计算

通过上面的操作步骤，有限元分析的前处理工作全部结束，为了保证求解能顺利完成，需要先检查一下前处理的所有操作是否正确，其操作步骤如下。

步骤 01 单击工具栏上的按钮，出现如图 25-31 所示的“Validation Check”对话框，绿色对号说明前面的基本操作步骤没有问题。



如果出现了，说明前处理过程中某些步骤有问题，应根据右侧的提示信息进行检查。

步骤 02 右击 Project Manager 中的“Analysis”→“Setup1”，在弹出的快捷菜单中选择如图 25-32 所示的“Analyze”命令，进行求解计算。

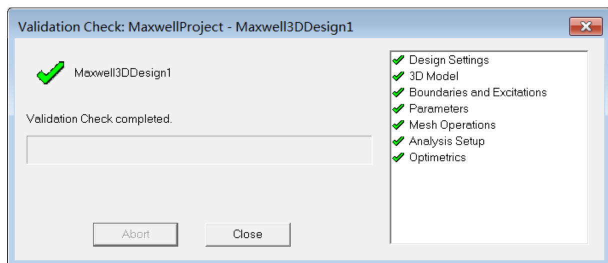


图 25-31　模型检查

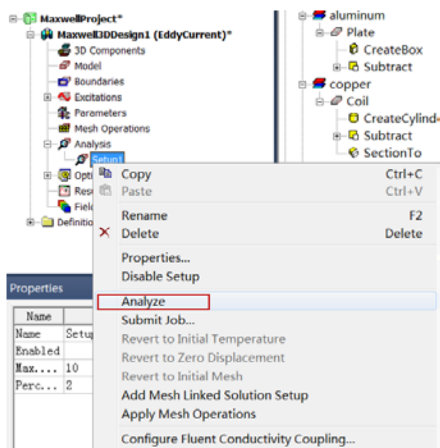


图 25-32　求解计算

25.2.10 后处理

步骤 01 求解完成后，选中 Plate 模型，右击，在弹出的如图 25-33 所示的快捷菜单中选择“Field”→“J”→“Mag_J”命令，弹出如图 25-34 所示的“Create Field Plot”对话框。

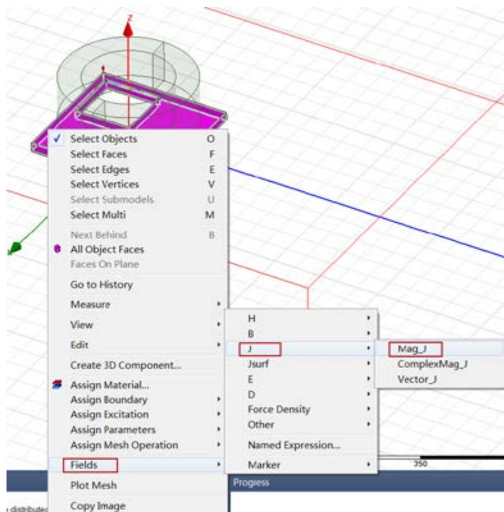


图 25-33　后处理操作

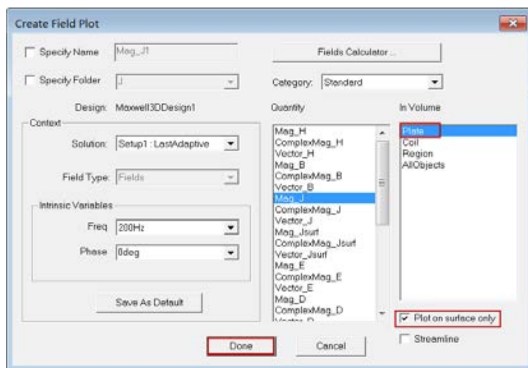


图 25-34　选择后处理实体

步骤02 在“Create Field Plot”对话框中的“Quantity”中选择“Mag_J”，在“In Volume”中选择“Plate”，并选中“Plot on surface only”复选框，密度云图如图25-35所示。

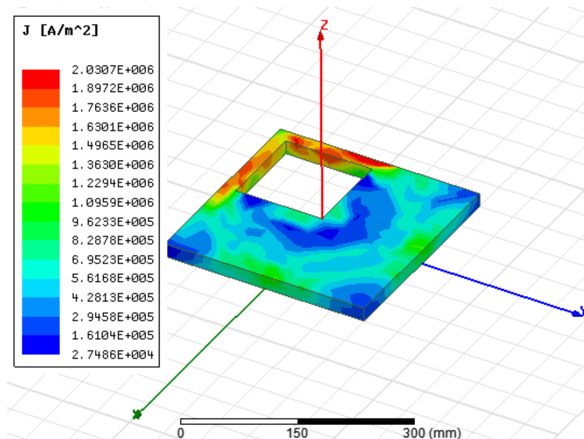


图25-35 密度云图



通过选择菜单“View”→“Render”→“Wire Frame”或者按〈F6〉键，可以将图形切换为线框图。

步骤03 单击“保存”按钮，保存文档名为“Hot”，然后单击“关闭”按钮关闭Maxwell 3D软件，返回到Workbench主窗口。

25.2.11 创建数据共享

步骤01 返回到Workbench窗口中，在如图25-36所示的A4栏“Solution”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Transfer Data To New”→“Steady-State Thermal”命令，此时会在项目A的右侧出现一个项目B，同时出现A4与B5的连接曲线。这说明A4的结果数据可以作为B5的外载荷使用。

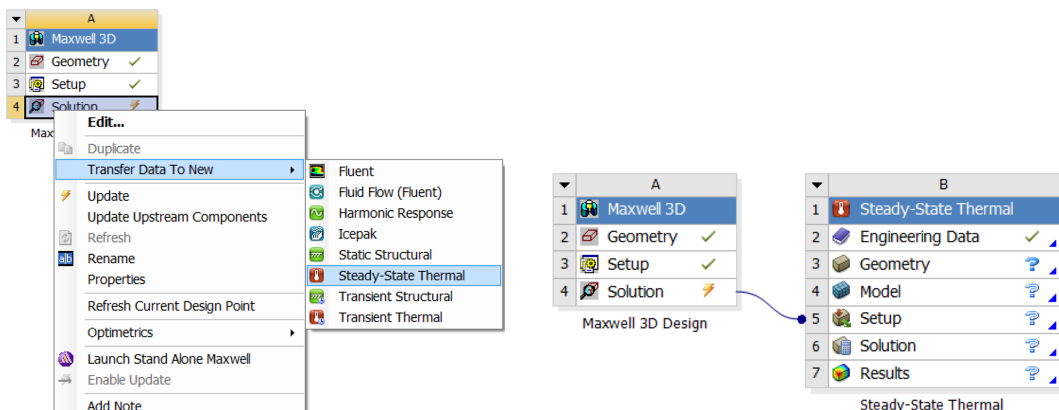
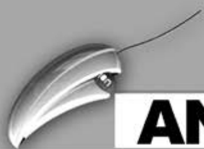


图25-36 创建模型



步骤02 单击如图 25-37 所示的 A2 栏“Geometry”并拖曳到 B3 栏“Geometry”中。

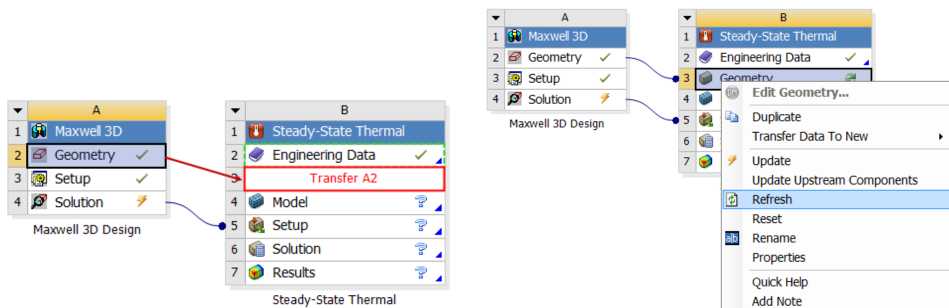


图 25-37　共享几何模型数据

步骤03 在 B3 栏“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Refresh”命令，当数据被成功读入后，会在 B3 表格后面出现✓。

步骤04 在 B3 栏“Geometry”中右击，在弹出的如图 25-38 所示的快捷菜单中选择“Edit Geometry”命令。在如图 25-39 所示的 DesignModeler 操作界面中，可以对模型进行修改操作。

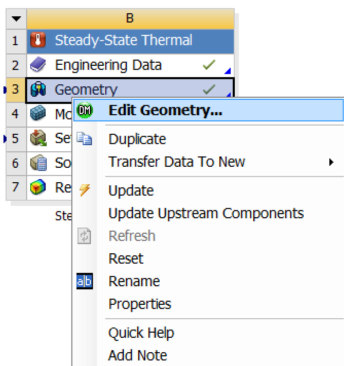


图 25-38　“编辑几何”命令

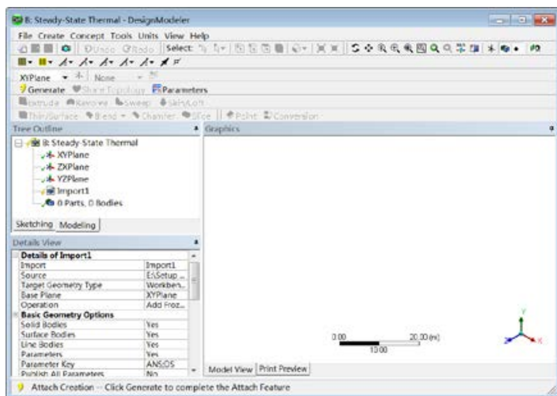


图 25-39　启动 DesignModeler

步骤05 在左侧的模型树 Tree Outline 中的“Import1”右击，在弹出的如图 25-40 所示的快捷菜单中选择“Generate”命令，几何模型被显示到 DesignModeler 绘图区域中，如图 25-41 所示。单击“保存”按钮后关闭 DesignModeler，返回 Workbench 主窗口。

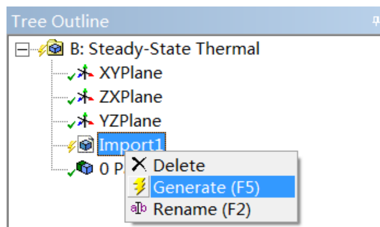


图 25-40　生成模型数据

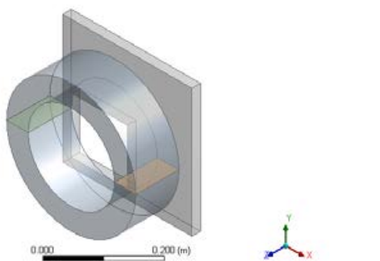


图 25-41　几何模型

步骤06 在 A4 栏“Solution”中右击，在弹出的快捷菜单中选择“Update”命令，经过计算，A4 栏“Solution”后的图标由变成，如图 25-42 所示。这说明 A4 数据已经成功传递给 B5。

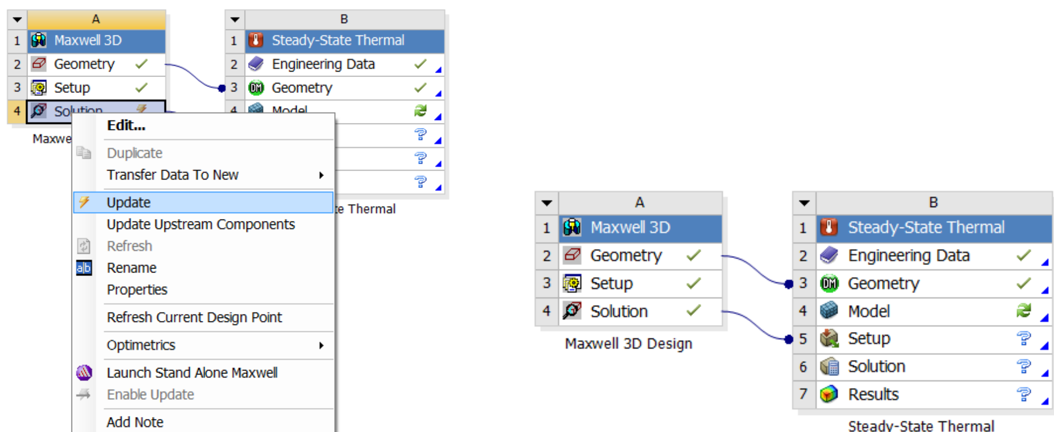
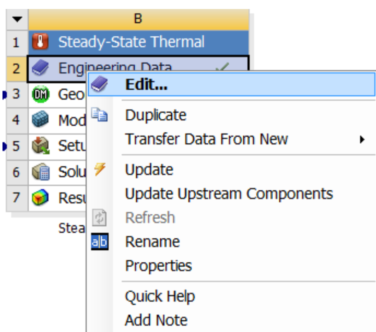


图 25-42 数据传递

25.2.12 设定材料

步骤01 在 B2 栏中的“Engineering Data”中右击，在弹出的快捷菜单中选择“Edit”命令，如图 25-43 所示。

步骤02 进入如图 25-44 所示的材料库，单击工具栏上的“Engineering Data Sources”按钮选择“General Materials”→“Aluminum Alloy”，设定完成后单击“Project”按钮切换到工程界面下。



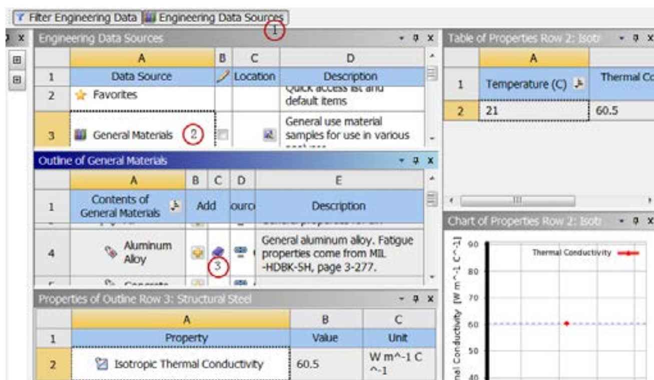


图 25-43 材料属性设定 图 25-44 材料选择

步骤03 在 B4 栏“Model”上右击，在弹出的如图 25-45 所示的快捷菜单中选择“Refresh”命令，进入如图 25-46 所示的 Mechanical 操作界面。

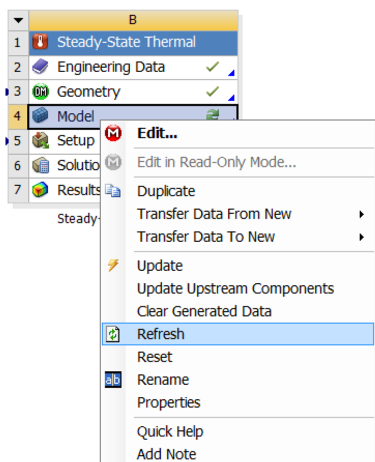


图 25-45 编辑 Mechanical

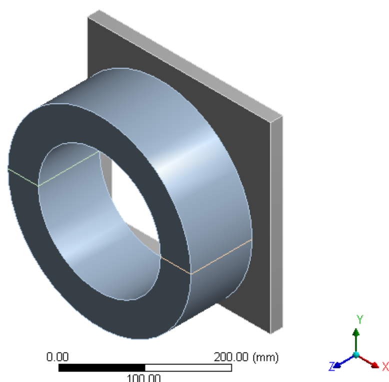


图 25-46 Mechanical 中的模型



在温度场分布计算时不需要刚才创建的截面，所以需要抑制掉，并将Coil也抑制掉。

步骤 04 选择 Outline 中“Model（B4）”→“Geometry”中的 4 个模型，在下面的 Details of “Plate”中的“Material”→“Assignment”中选择“Aluminum Alloy”，如图 25-47 所示。

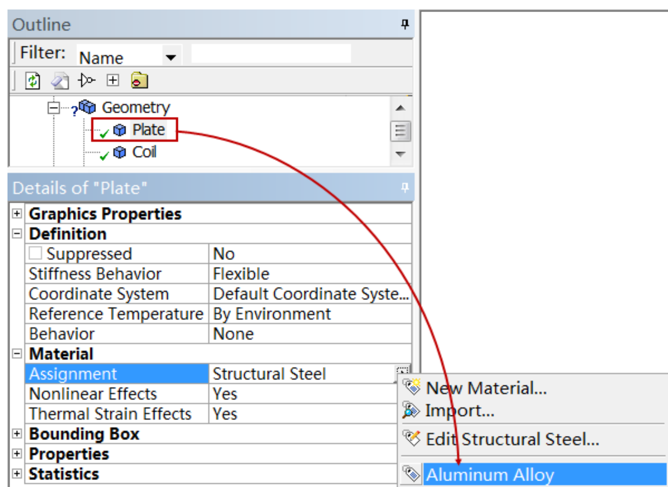


图 25-47 赋予材料属性

25.2.13 划分网格

步骤 01 在“Project”→“Model（B4）”→“Mesh”命令上右击，在弹出的如图 25-48 所示的快捷菜单中选择“Insert”→“Method”命令。

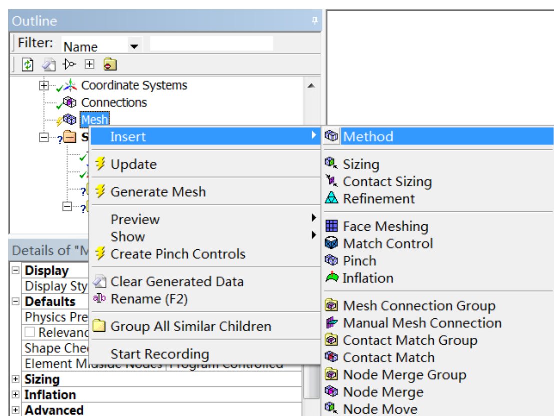


图 25-48 插入网格划分方式

步骤02 如图 25-49 所示，选中 Plate 模型，选择 Details of“Automatic Method”中的“Method”→“Automatic”，其余保持默认值即可。

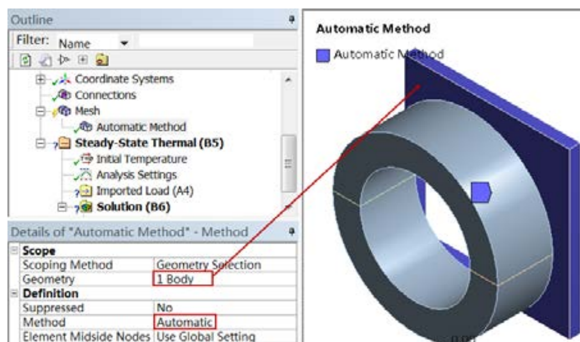


图 25-49 自动网格划分设置

步骤03 右击“Mesh”命令，在弹出的快捷菜单中选择“Update”命令，划分完成后的网格如图 25-50 所示。

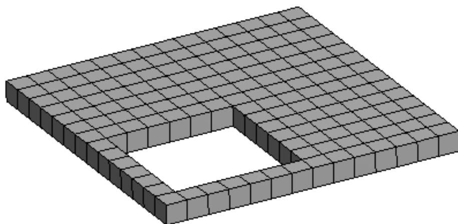


图 25-50 网格生成

25.2.14 添加边界条件与映射激励

步骤01 选中如图 25-51 所示的设置表面传热系数，在 Details of “Convection”细节窗口中进行如下操作：在“Geometry”中确保铝方板被选中；在“Film Coefficient”中输入膜系数为 6.3。



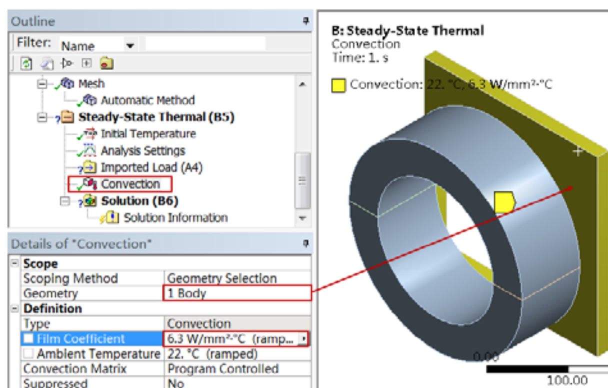


图 25-51　边界条件

步骤 02　右击“Imported Load（A4）”，在弹出的如图 25-52 所示的快捷菜单中选择“Insert”→“Heat Generation”命令。

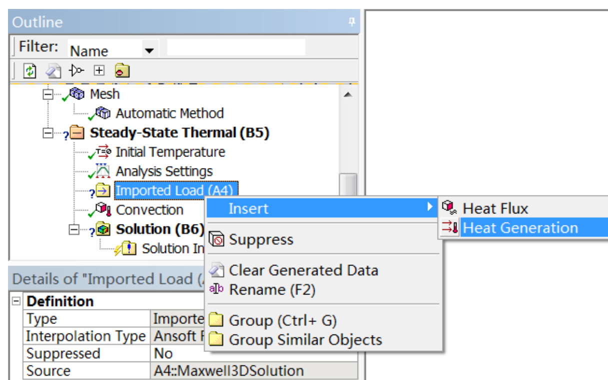


图 25-52　快捷菜单

步骤 03　选择如图 25-53 所示的绘图区域中的 Body 模型。

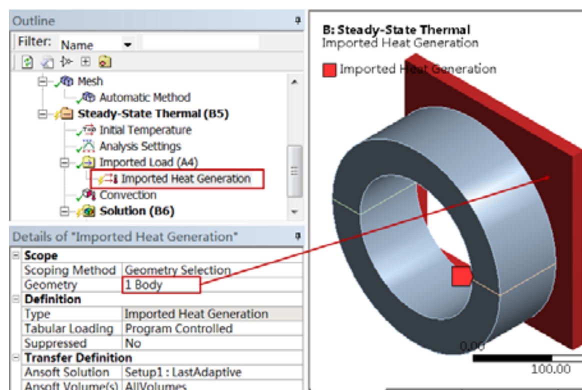


图 25-53　选择实体

步骤 04　如图 25-54 所示，选择“Imported Heat Generation”命令并右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Load”命令，经过一段时间的计算，映射完成后的损耗云图如

图 25-55 所示。

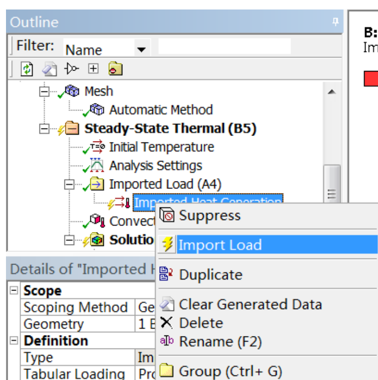


图 25-54　导入载荷

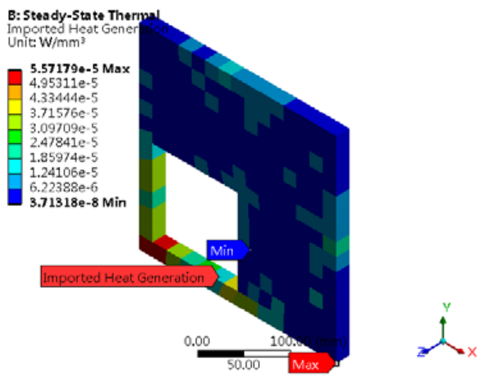


图 25-55　损耗云图

25.2.15 求解计算

在“Steady-State Thermal（B5）”上右击，在弹出的如图 25-56 所示的快捷菜单中选择“Solve”命令，进行求解计算。

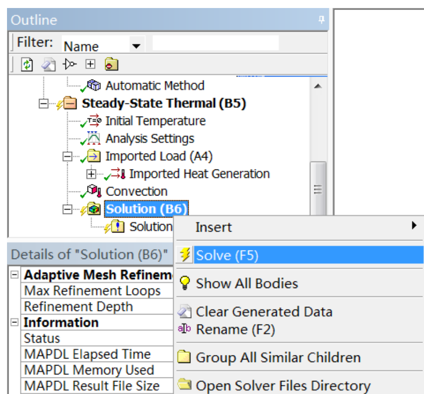


图 25-56　求解计算

25.2.16 后处理

步骤 01 右击“Solution”命令，在弹出的如图 25-57 所示的快捷菜单中选择“Insert”→“Thermal”→“Temperature”命令，添加温度分布云图。

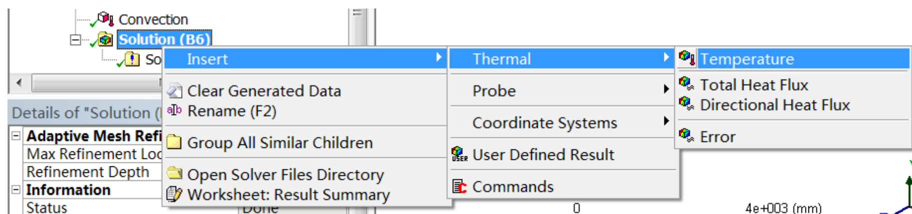


图 25-57　温度云图设置

步骤 02 温度分布云图如图 25-58 所示。同理可以添加热流分布云图，如图 25-59 所示。

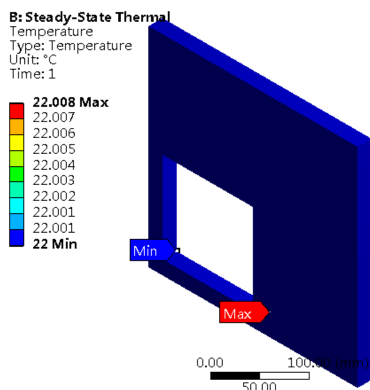


图 25-58 温度分布云图

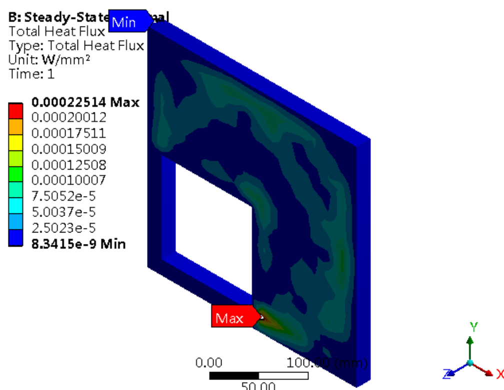


图 25-59 热流分布云图

步骤 03 单击“保存”按钮，保存文件，然后单击“关闭”按钮返回到 Workbench 窗口。

25.3 本章小结

本章首先介绍了ANSYS Workbench 17.0 版本的多物理场分析能力与分析类型，然后通过简单的示例介绍了通过ANSYS Maxwell模块与ANSYS Mechanical模块之间的单向耦合进行的电磁热耦合分析。



第 26 章 优化设计分析

ANSYS Workbench 提供的 Design Exploration 应用为优化设计提供了方便的途径，且目前在工程分析中取得了广泛的应用。使用 Design Exploration 应用提供的优化设计功能，当参数在一定范围内变化时可以进行，结构的响应情况分析。本章将介绍 Design Exploration 应用的基本操作。

学习目标：

- 熟悉 Design Exploration 应用类型。
- 理解 Design Exploration 应用产生的结果。
- 练习使用 Design Exploration 应用进行分析。

26.1 优化设计基础

Design Exploration 可以将各种设计参数集成到分析过程中，基于实验设计技术和变分技术，使设计人员能快速地建立设计空间、进行优化设计和可靠性分析。实验设计包括：

1）直接优化（Direct Optimization）。

2）相关参数（Parameters Correlation）。

3）响应面（Response Surface）。

4）响应面优化（Response Surface Optimization）。

5）六西格玛分析（Six Sigma Analysis）。

下面介绍 Design Exploration 优化设计模块的有关概念和相关的系统。

26.1.1 优化设计概览

本节介绍 Design Exploration 优化设计模块有关基础概念和流程的概览。

1．参数

Design Exploration 中共有 3 种可以使用的参数，具体如下。

（1）输入参数　所有在计算之前定义的参数均可以作为 Design Exploration 的输入参数，其主要的类型包括几何参数、材料参数、载荷参数和网格参数。

（2）输出参数　输出参数一般为求解结果或相应输出，常见的输出参数包括体积、质量、频率、压力、热通量、元素数量等。

（3）导出参数　导出参数一般为输入参数、输出参数中一个或多个的组合，其通过特定

的运算方法结合，代表用户设置的指标。

2．设计点

设计点代表一系列的参数值，其中的输出参数直接通过更新项目得到。设计点由 Design Exploration 直接创建。

3．响应点

响应点代表一系列的参数值，其中的输出参数通过 Design Exploration 得到。这些输出参数值是从响应面得到的近似值，在使用时还需要将对应参数的模型进行计算。

4．工作流程

使用 Design Exploration 进行参数分析的基本流程如下。

1）创建分析模型并导入到 Workbench 中进行分析。

2）选择需要使用的参数。

3）向项目添加需要使用的 DX（Design Exploration）参数。

4）设置分析选项和参数上下限。

5）更新分析。

6）查看 DX 分析结果。

7）生成分析报告。

5．图表操作

在 DX 中可以实现以下图表操作：

1）添加图表。相关操作如图 26-1 所示，通过选择“Insert”命令实现。

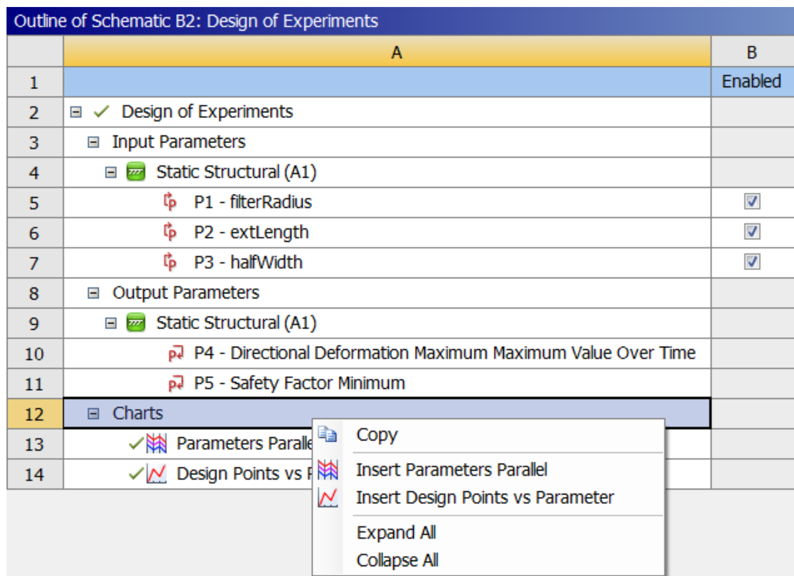


图 26-1　添加图表

2）复制图表。相关操作如图 26-2 所示，通过选择“Duplicate”命令实现。

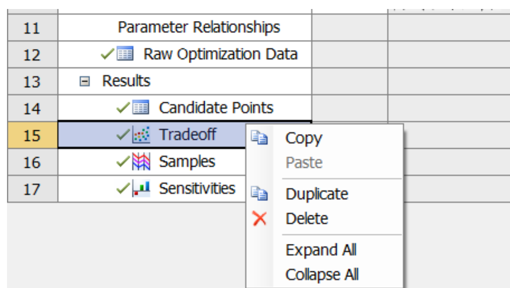


图 26-2 复制/删除图表

3）删除图表。相关操作如图 26-2 所示，通过选择“Delete”命令实现。

6．输入和输出

在 DX 中得到的图表可以输出到 ASCII 文件（CSV 格式）中，相应的输出操作如图 26-3 和图 26-4 所示。也可以通过项目工程图中右击相应的选项，在弹出的快捷菜单中选择“Import”命令来导入 CSV 格式文件中的图表信息。

Table of Schematic B2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto Defined)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - x_1	P2 - x_2	P3 - x_3	P4 - x_4	P5 - x_5	P6 - f	P7 - g
2	1 (DP 0)	0	0	0	0	0	5.8189	1.5625
3	10 (DP 14)	0	0	0				
4	11 (DP 15)	0	0	0				
5	12 (DP 3)	-28.334	-28.334	-28.3				
6	13 (DP 18)	28.334	-28.334	-28.3				
7	14 (DP 7)	-28.334	28.334	-28.3				
8	15 (DP 22)	28.334	28.334	-28.3				
9	16 (DP 5)	-28.334	-28.334	28.3				
10	17 (DP 20)	28.334	-28.334	28.3				
11	18 (DP 9)	-28.334	28.334	28.3				
12	19 (DP 24)	28.334	28.334	28.3				
13	2 (DP 2)	-100	0	0				
14	20 (DP 4)	-28.334	-28.334	-28.3				
15	21 (DP 19)	28.334	-28.334	-28.3				

Copy
Set Update Order by Row
Show Update Order
Optimize Update Order
Import Design Points...
Insert as Design Point
Export Data
Copy all Design Points from the Parameter Set
Expand All
Collapse All

图 26-3 表数据输出

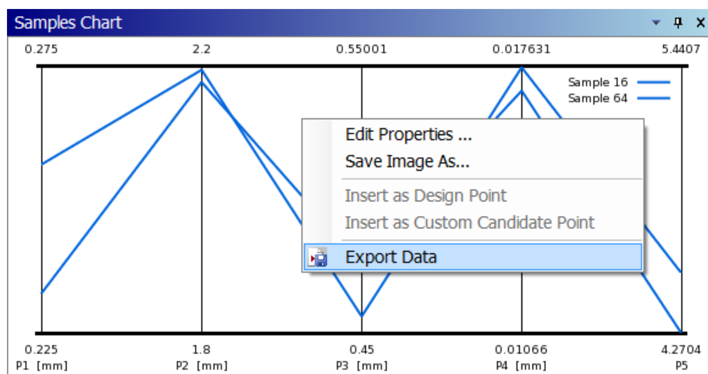


图 26-4 图数据输出

26.1.2 实验设计

实验设计（DOE）技术可以用来科学地确定采样点的位置，也可以成为其他各参数分析

过程的一部分。实验设计的方法包括如下几种。

1）中心组合设计（Central Composite Design）。

2）优化空间填充设计（Optimal Space-Filling Design）。

3）Box-Bnhnken 设计。

4）用户自定义设计（Custom）。

5）自定义取样设计（Custom Sampling）。

6）初始系数网格（Sparse Grid Initialization）。

7）Latin Hypercube 采样设计。

在实验设计中，输入参数的个数对 DOE 和响应面的生成有很大影响。选取的参数越多，则计算所需的时间越长。选取参数个数与设计点数目的对应关系见表 26-1。在使用时，可以通过 DOE 的界面观察选取的参数，如图 26-5 所示。

表 26-1　选取参数个数与设计点数目的对应关系

输出参数个数	设计点数量	输出参数个数	设计点数量
1	5	11	151
2	9	12	281
3	15	13	283
4	25	14	285
5	27	15	287
6	45	16	289
7	79	17	291
8	81	18	549
9	147	19	551
10	149	20	553

Outline of Schematic B2: Design of Experiments

	A	B	C
1		Enabled	Message
2	Design of Experime...		1
3	Input Parameters		
4	Mechanical APDL (A1)		
5	P1 - X1	☑	
6	P2 - X2	☑	
7	P3 - X3	☑	
8	P4 - X4	☑	
9	P5 - X5	☑	
10	P6 - X6	☑	

图 26-5　DOE 输入参数

26.1.3 相关参数

在进行目标驱动优化（GDO）和六西格玛分析（SSA）时，所需的计算量非常大。在实

际使用时，推荐先进行相关参数分析，找出分析中的主要因素。

在应用中通常通过图表找出重要相关参数。Parameters Correlation 提供了 5 种不同的相关参数图，其添加菜单如图 26-6 所示。

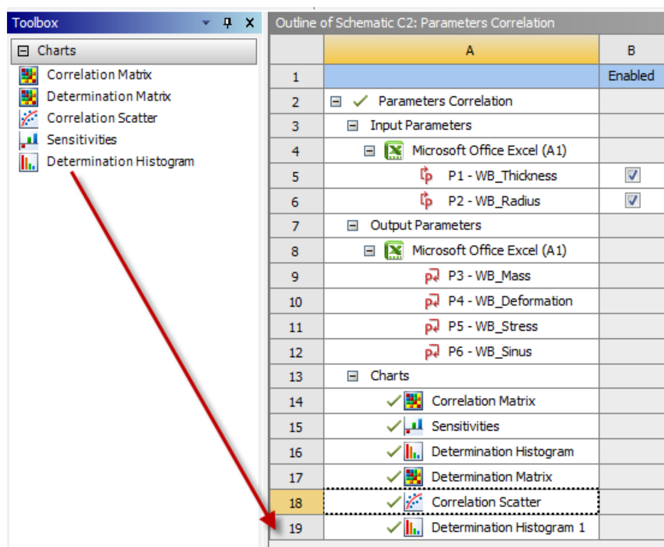


图 26-6　添加相关参数图

1. 相关性矩阵图（Correlation Matrix Chart）

图 26-7 使用了不同的颜色代表不同参数间的相关性。

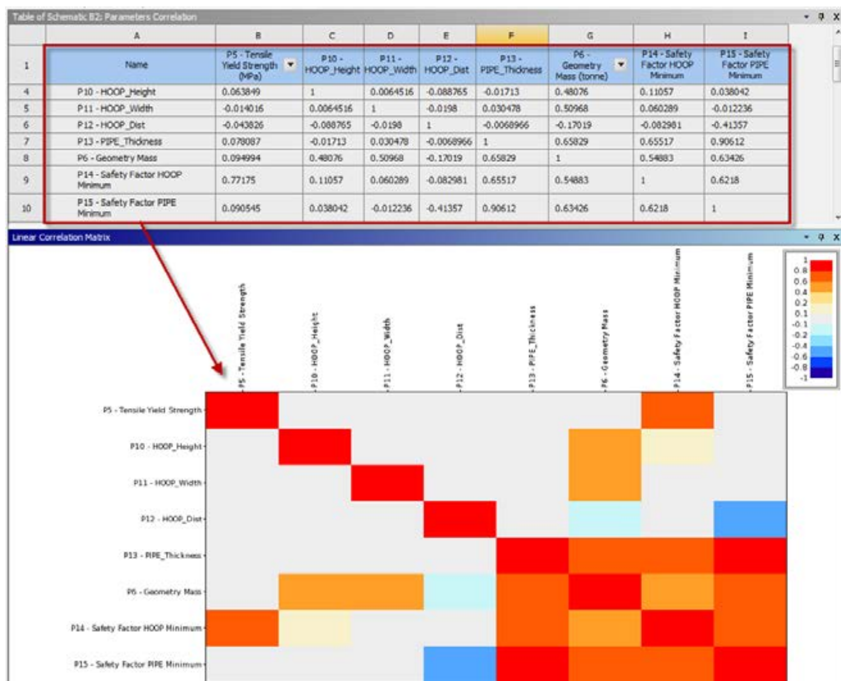


Table of Schematic B2: Parameters Correlation

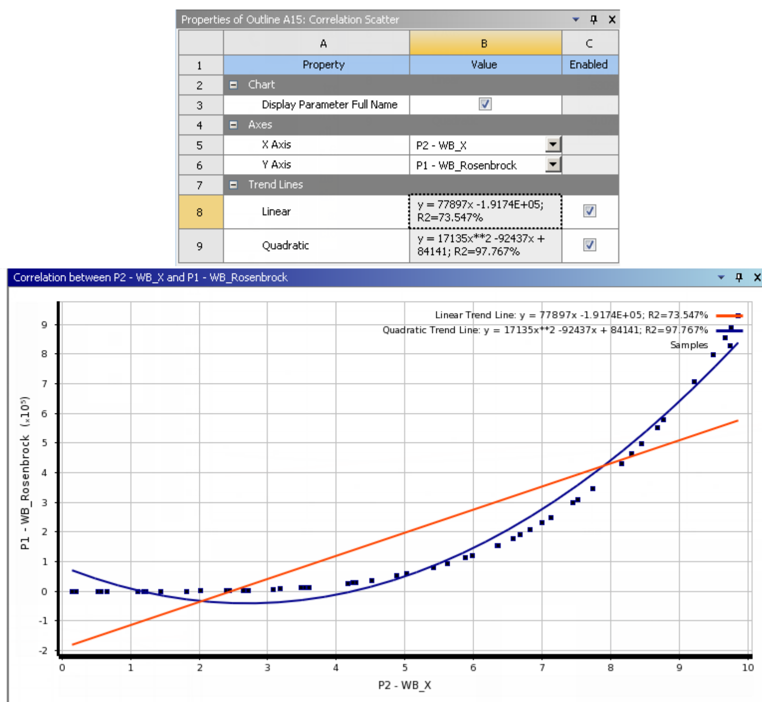
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	P5 - Tensile Yield Strength (MPa)	P10 - HOOP_Height	P11 - HOOP_Width	P12 - HOOP_Dist	P13 - PIPE_Thickness	P6 - Geometry Mass (tonne)	P14 - Safety Factor HOOP Minimum	P15 - Safety Factor PIPE Minimum
4	P10 - HOOP_Height	0.063849	1	0.0064516	-0.088765	-0.01713	0.48076	0.11057	0.038042
5	P11 - HOOP_Width	-0.014016	0.0064516	1	-0.0198	0.030478	0.50968	0.060289	-0.012236
6	P12 - HOOP_Dist	-0.043826	-0.088765	-0.0198	1	-0.0068966	-0.17019	-0.082981	-0.41357
7	P13 - PIPE_Thickness	0.078087	-0.01713	0.030478	-0.0068966	1	0.65829	0.65517	0.90612
8	P6 - Geometry Mass	0.094994	0.48076	0.50968	-0.17019	0.65829	1	0.54883	0.63426
9	P14 - Safety Factor HOOP Minimum	0.77175	0.11057	0.060289	-0.082981	0.65517	0.54883	1	0.6218
10	P15 - Safety Factor PIPE Minimum	0.090545	0.038042	-0.012236	-0.41357	0.90612	0.63426	0.6218	1

图 26-7　相关性矩阵图（Correlation Matrix Chart）



2. 相关性散点图（Correlation Scatter Chart）

图 26-8 所示为相关性散点图，它给出了参数与相关性的对应图，并进行了拟合。



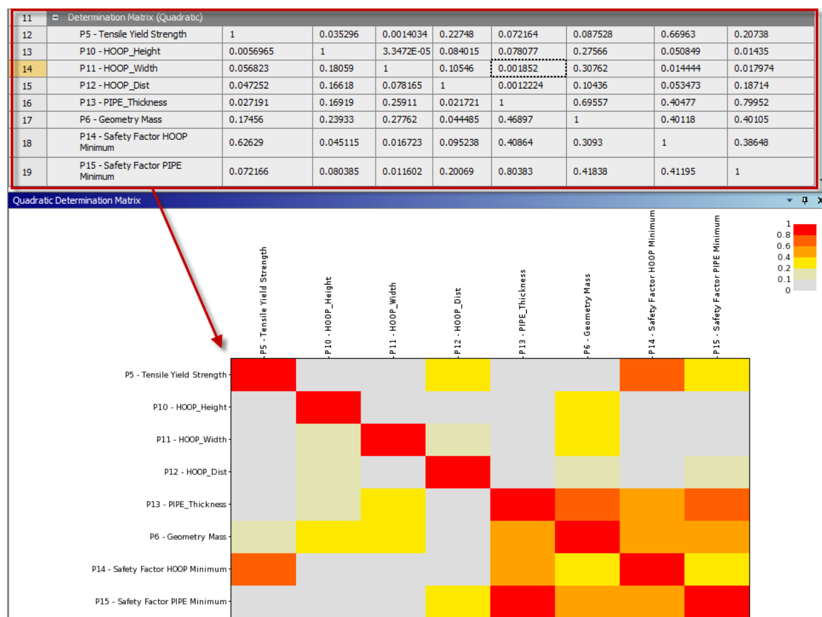
Properties of Outline A15: Correlation Scatter

	A	B	C
1	Property	Value	Enabled
2	⊟ Chart		
3	Display Parameter Full Name	☑	
4	⊟ Axes		
5	X Axis	P2 - WB_X	
6	Y Axis	P1 - WB_Rosenbrock	
7	⊟ Trend Lines		
8	Linear	y = 77897x -1.9174E+05; R2=73.547%	☑
9	Quadratic	y = 17135x**2 -92437x + 84141; R2=97.767%	☑

图 26-8 相关性散点图（Correlation Scatter Chart）

3. 确定性矩阵图（Determination Matrix Chart）

如图 26-9 所示，确定性矩阵图与相关性矩阵图相似，但它不对称。



11	⊟ Determination Matrix (Quadratic)								
12	P5 - Tensile Yield Strength	1	0.035296	0.0014034	0.22748	0.072164	0.087528	0.66963	0.20738
13	P10 - HOOP_Height	0.0056965	1	3.3472E-05	0.084015	0.078077	0.27566	0.050849	0.01435
14	P11 - HOOP_Width	0.056823	0.18059	1	0.10546	0.001852	0.30762	0.014444	0.017974
15	P12 - HOOP_Dist	0.047252	0.16618	0.078165	1	0.0012224	0.10436	0.053473	0.18714
16	P13 - PIPE_Thickness	0.027191	0.16919	0.25911	0.021721	1	0.69557	0.40477	0.79952
17	P6 - Geometry Mass	0.17456	0.23933	0.27762	0.044485	0.46897	1	0.40118	0.40105
18	P14 - Safety Factor HOOP Minimum	0.62629	0.045115	0.016723	0.095238	0.40864	0.3093	1	0.38648
19	P15 - Safety Factor PIPE Minimum	0.072166	0.080385	0.011602	0.20069	0.80383	0.41838	0.41195	1

图 26-9 确定性矩阵图（Determination Matrix Chart）

4. 确定性直方图（**Determination Histogram Chart**）

如图 26-10 所示，确定性直方图可以显示特定参数的影响。

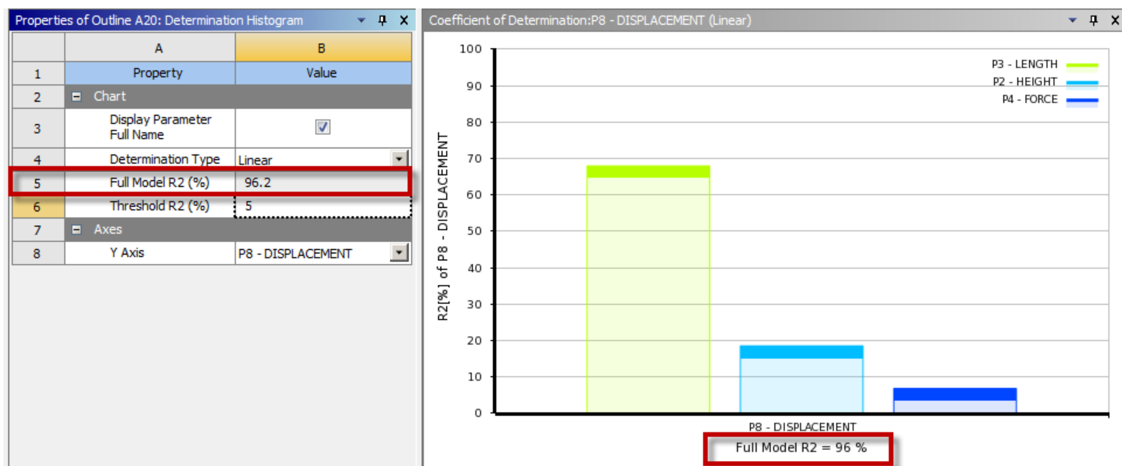


图 26-10　确定性直方图（Determination Histogram Chart）

5. 敏感性图（**Sensitivities Chart**）

如图 26-11 所示，敏感性图可以显示输出参数对于输入参数的敏感性。

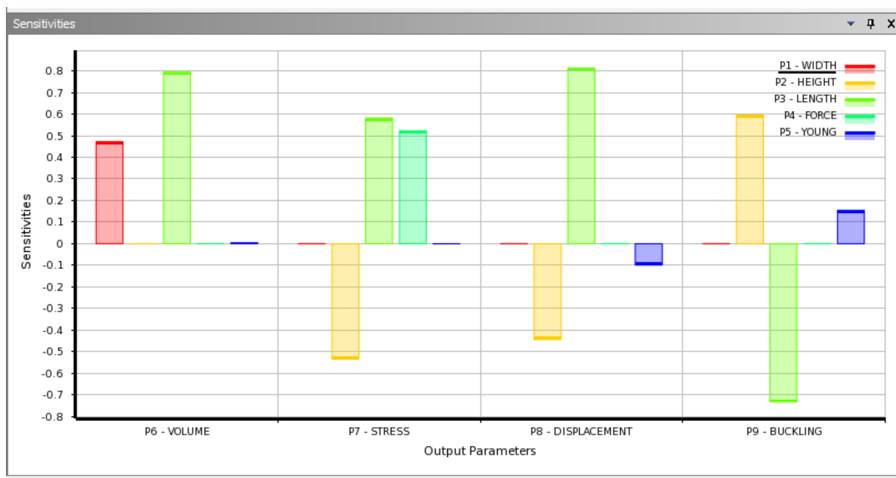


图 26-11　敏感性图（Sensitivities Chart）

26.1.4 响应面

响应面可以用来直观地评估输入参数对输出参数的影响，与相关参数相似，可以使用图标来显示结果。常见的响应面结果如下。

1）二维响应面图，如图 26-12 所示。

2）三维切片响应面图，如图 26-13 所示。

3）二维切片响应面图，如图 26-14 所示。

4）蛛网图，如图 26-15 所示。

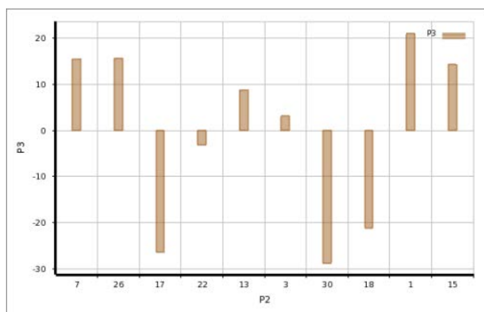


图 26-12　二维响应面图

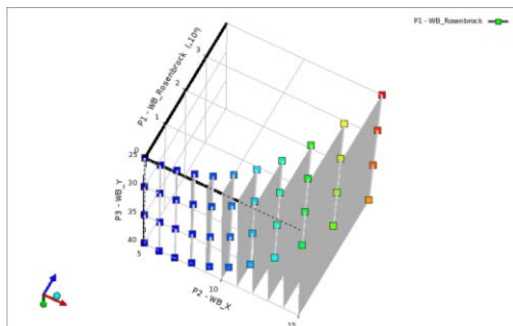


图 26-13　三维切片响应面图

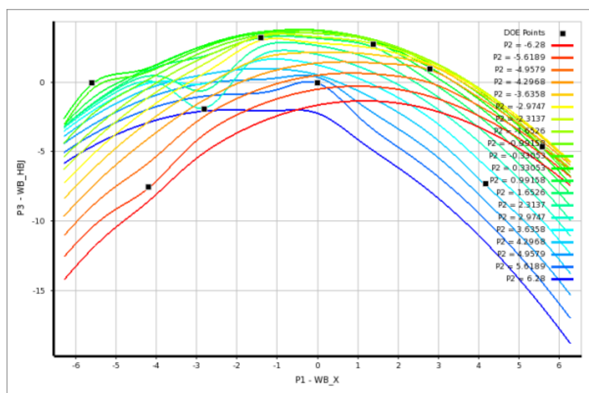


图 26-14　二维切片响应面图

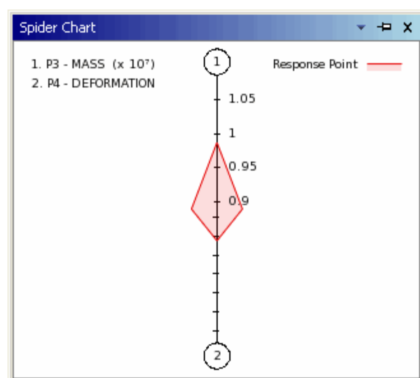
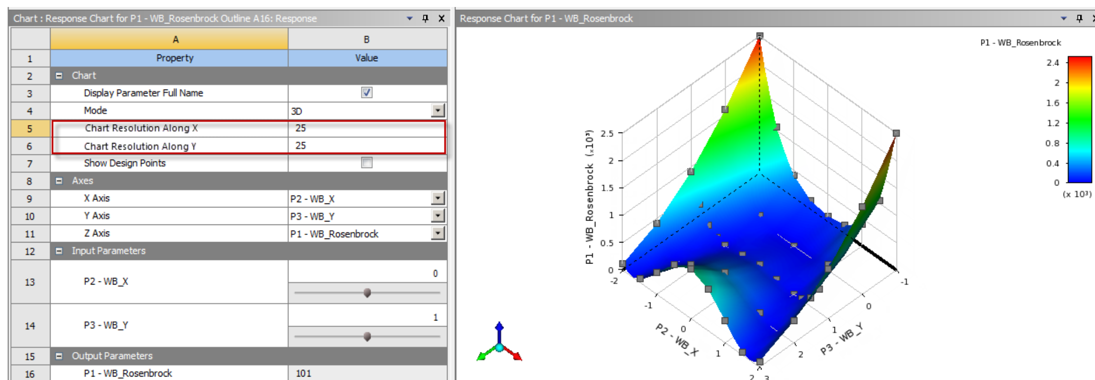


图 26-15　蛛网图

5）设计空间图，如图 26-16 所示。



	A	B
1	Property	Value
2	Chart	
3	Display Parameter Full Name	☑
4	Mode	3D
5	Chart Resolution Along X	25
6	Chart Resolution Along Y	25
7	Show Design Points	☐
8	Axes	
9	X Axis	P2 - WB_X
10	Y Axis	P3 - WB_Y
11	Z Axis	P1 - WB_Rosenbrock
12	Input Parameters	
13	P2 - WB_X	0
14	P3 - WB_Y	1
15	Output Parameters	
16	P1 - WB_Rosenbrock	101

图 26-16　设计空间图

26.1.5 目标驱动优化

DX 提供了两种目标驱动优化方式，具体如下。

1）响应面优化（Response Surface Optimization）。

2）直接优化（Direct Optimization）。

创建目标驱动优化的基本流程为：

1）添加响应面优化（Response Surface Optimization）系统或直接优化（Direct Optimization）系统。

2）对于响应面优化系统，首先求解 DOE 和响应面项目。对于直接优化系统，首先导入设计点数据。

3）在项目工程图上，双击“Optimization”项。

4）设置优化方法。

5）设置优化目标与约束。

6）设置优化域。

7）单击“Update”更新系统。

定义优化目标与约束可以通过优化项内的“Objectives and Constraints”选项进行，界面如图 26-17 所示。

Table of Schematic D4: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Seek P1 = 1300; 1100 <= P1 <= 1500	P1 - WB_Rosenbrock	Seek Target	1300	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	1100	1500
4	Minimize P4; P4 <= 1000	P4 - WB_X	Minimize		Values <= Upper Bound		1000
5	Seek P3 = 1.1	P3 - WB_Y	Seek Target	1.1	No Constraint		
*							

图 26-17　定义优化目标与约束

定义优化域的界面如图 26-18 所示。

Cell A2: Analysis Schematic B2: Optimization

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
2	Optimization		
3	Objectives and Constraints		
4	Minimize P3		
5	Domain		
6	Microsoft Office Excel (A1)		
7	P1 - x1_	☑	
8	P2 - x2_	☑	
9	Parameter Relationships		
10	P2 >= P1	☑	
11	P2-P1 <= 3[mm]	☑	

Table of Schematic B2: Optimization

	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P1 - x1_ (mm)	0	10	
4	P2 - x2_ (mm)	0	10	
5	Parameter Relationships			
6	Name	Left Expression	Operator	Right Expression
7	P2 >= P1	P2	>=	P1
8		0 [m]		0 [m]
9	P2-P1 <= 3[mm]	P2-P1	<=	3[mm]
10		0 [m]		0.003 [m]
*	New Parameter Relationship	New Expression	<=	New Expression

图 26-18　定义优化域

进行目标驱动优化分析得到的结果，除可以采用前文中看到的灵敏度图外，还可以通过下列图标查看目标驱动优化分析结果。

1. 权衡图

权衡图分为三维权衡图（图 26-19）和二维权衡图（图 26-20），代表目标驱动优化分析中使用的样本组。图中的颜色显示与既定设计匹配程度有关，蓝色的表示好，红色的表示差。

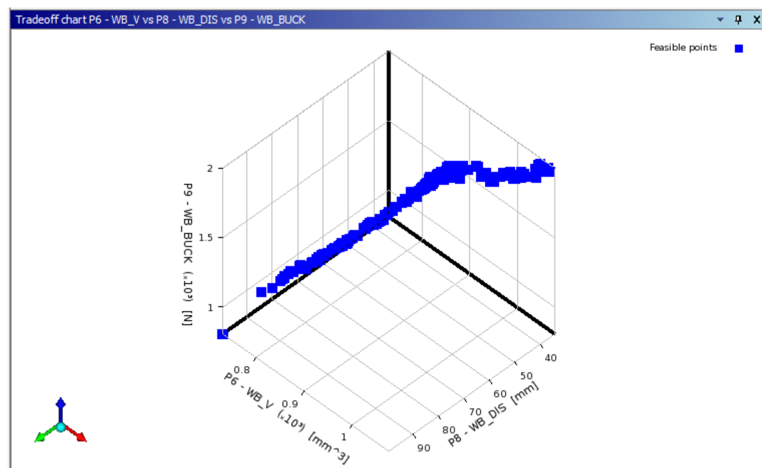


图 26-19　三维权衡图

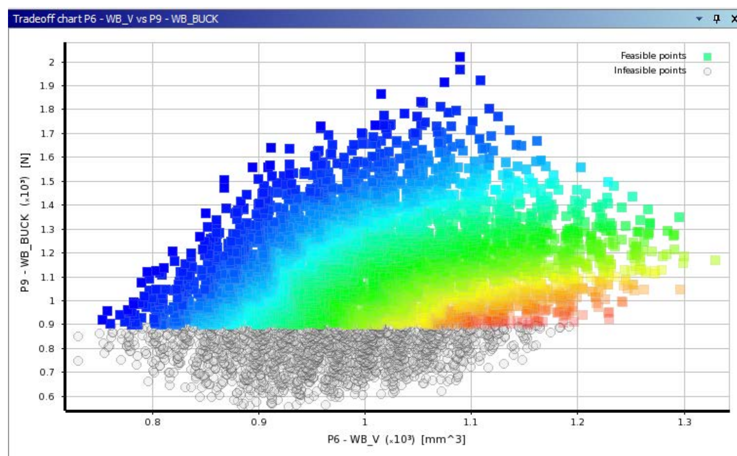


图 26-20　二维权衡图

2. 样品图

样品图（图 26-21）具有后处理功能，在求解后该图便显示。

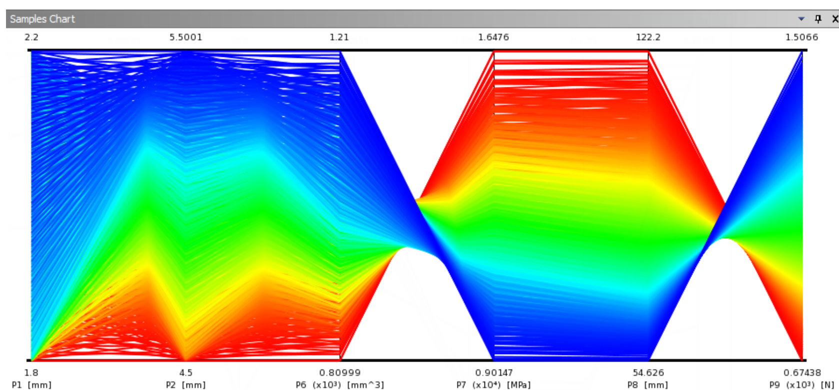


图 26-21　样品图

3. 时间历程图

通过时间历程图（图 26–22）可以观察设计点在更新过程中的时间历程显示。

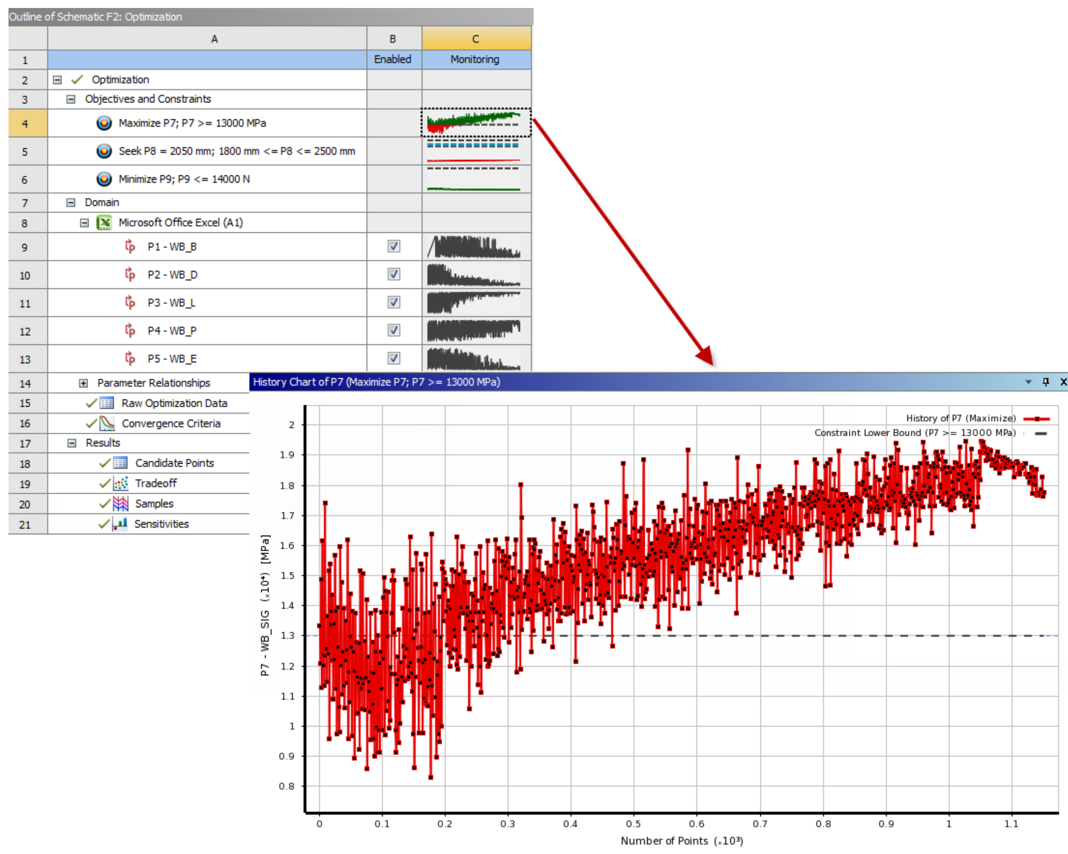


图 26–22　时间历程图

优化完成后，可以在项目工程图区域查看结果，其中星图标为满足要求的结果，如图 26–23 所示。星图标的个数越多，则优化的效果越好。

Table of Schematic B2: Optimization , Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	H	I	J	K
1	Reference	Name	P1…	P2 - x_2	P3 - x_3	P4 - x_4	P5 - x_5	P2-P1 <= 3[mm]		P6 - f		P7 - g	
2								P2-P1	3[mm]	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Starting Point	11.51	77.866	3	-94	7	0 [mm]	3 [mm]	★★★ -9043.7	9.97 %	★★★ 166.32	3,235.91 %
4	○	Starting Point (verified) (DP 150)						0 [mm]	3 [mm]	★★★ -8237.3	18.00 %	★★★ 166.32	3,235.91 %
5	○	Candidate Point 1	1.3168	94.646	1	-100	-1	1.043 [mm]	3 [mm]	★★★ -10045	0.00 %	★★★ 6.0882	22.11 %
6	◉	Candidate Point 1 (verified) (DP 151)						1.043 [mm]	3 [mm]	★★★ -10094	-0.49 %	★★★ 6.0882	22.11 %

图 26–23　查看结果

26.1.6 六西格玛分析

六西格玛分析（Six Sigma Analysis，SSA）可以用来在输出参数不确定的情况下进行模

型的评估分析。

进入 SSA 分析环境后，将应用自动给出数据的分布函数。在求解完成后，输出参数的分布函数也自动给出。

26.2 优化设计应用示例

本节以结构力学分析为基础，使用 DX 进行响应面计算、目标驱动优化和 SSA 分析。

26.2.1 基础分析

1. 创建分析项目

1）在 Windows 操作系统（Windows 8 版本以下）选择“开始”→“所有程序”→“ANSYS 17.0”→“Workbench 17.0”，或在 Windows 8 操作系统中找到 Workbench 17.0 图标并单击，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

2）双击主界面 Toolbox 工具箱中的“Analysis System”→“Static Structural”选项，在项目管理区创建分析项目 A，如图 26-24 所示。

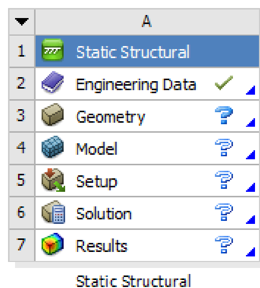


图 26-24　分析项目

2. 定义材料数据

1）双击项目 A 的 A2 栏中的“Engineering Data”项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

2）根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 2: Structure Steel 表中可以修改材料的特性，本例采用默认值。

3）关闭 A2:Engineering Data，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

3. 添加几何模型

1）在 A2 栏的“Geometry”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Import Geometry”→“Browse”，此时会弹出“打开”对话框。

2）在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入“chap26”几何体文件，此时 A2 栏“Geometry”后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

3）双击项目 A 中的 A2 栏“Geometry”，会进入到 DM 界面。此时如果设计树中显示 ⚡，则表示需要生成模型，可进行步骤 4)，否则可直接进入步骤 5)。

4）单击“Generate”按钮，即可显示生成的几何体，此时可在几何体上进行其他的操作。

5）在设计树中找到“Sketch 1”，并选择。然后设置其细节窗口中“Dimentions:5”下的“H4”“R5”和“V1”为设计参数，操作为单击参数前的方框，出现“D”标志即可，如图 26-25 所示。

6）单击 DM 界面右上角的“关闭”按钮退出 DM，返回到 Workbench 主界面。

4. 定义零件行为

1）双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏“Model”项，进入 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果查看等操作。导入的模型如图 26-26 所示。

Details View	
Details of Sketch1	
Sketch	Sketch1
Sketch Visibility	Show Sketch
Show Constraints?	No
Dimensions: 5	
H3	2 mm
D H4	0.5 mm
D R5	0.25 mm
D V1	2 mm
V2	0.7 mm
Edges: 8	
Line	Ln7
Line	Ln8
Line	Ln11
Line	Ln12
Line	Ln14
Line	Ln15
Line	Ln16
Circular Arc	Cr17

图 26-25 设置设计参数

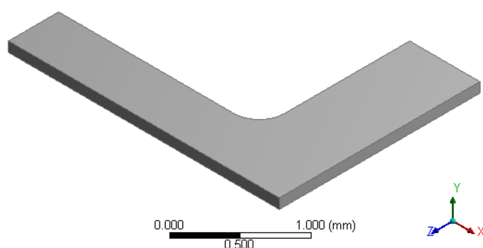


图 26-26 导入的模型

2）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中“Geometry”选项下的“Surface Body”，此时即可在 Details of“Surface Body”细节窗口中给模型添加材料。

3）单击参数列表中的“Material”选项下“Assignment”黄色区域后的▸，会出现设置的材料，选择即可将其添加到模型中。此时树结构图“Geometry”前的?变为✓，表示材料已经添加成功。本例中采用了默认的 Structural Steel，无需更改。

5. 划分网格

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Mesh”选项，此时可在 Details of“Mesh”细节窗口中修改网格参数，本例中采用默认设置。

2）在 Mesh 上单击右键，在快捷菜单中选择“Insert”→“Sizing”，然后选择圆角所在面，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，设置“Element Size”（单元尺寸）为“0.05mm”。

3）在“Mesh”上单击右键，在快捷菜单中选择“Insert”→“Method”，然后选择待划分的面体，在细节窗口中的“Geometry”中单击“Apply”按钮，并把细节窗口中的“Method”设置为“MultiZone”。

4）在 Outline 树结构图中的“Mesh”选项上右击，然后在弹出的快捷菜单中选择“Generate Mesh”，生成网格最终的效果如图 26-27 所示。

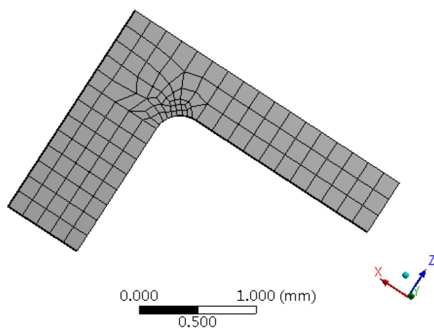


图 26-27 网格模型

6. 定义边界条件

1）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，此时会出现 Environment 工具栏。

2）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Fixed Support”，此时在树结构图中会出现“Fixed Support”选项。

3）选中“Fixed Support”，选择粗臂的端面，单击 Details of “Fixed Support”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中面上施加位置约束。

4）选择 Environment 工具栏中的“Supports”→“Displacement”，此时在树结构图中会出现“Displacement”选项。

5）选中“Displacement”，选择 *Z* 方向坐标为 0 的面，单击 Details of “Displacement”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，即可在选中边缘上施加位置约束。此时设置 *X* 向的位移为 0。

6）选择 Environment 工具栏中的“Loads”→“Force”，此时在树结构图中会出现“Force”选项。

7）选中“Force”，选择需要施加力的支撑端端面，单击 Details of “Force”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，同时设置“Y Component”为“0.015N”。然后单击 *Y* 轴正向，并在“Direction”中单击“Apply”按钮。

8）选择 Mechanical 界面左侧 Outline 树结构图中的“Static Structural（A5）”选项，查看边界条件示意图，如图 26-28 所示。

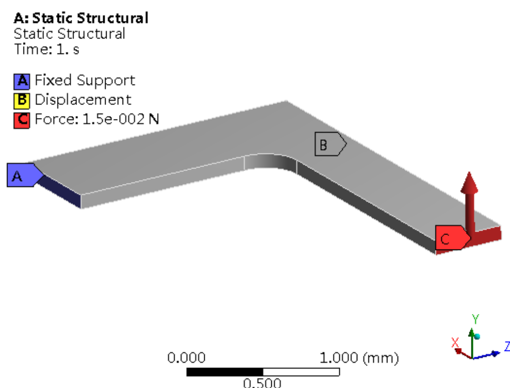


图 26-28　边界条件示意图

7. 求解

在 Outline 树形图中的“Static Structural（A5）”选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Solve”，此时会弹出进度显示条，表示正在求解。当求解完成后进度条就会自动消失。求解完成后可以通过 Solution Information 查看求解过程信息。

8. 查看结果

1）选择 Mechanical 界面左侧树结构图中的“Solution（A6）”选项，此时出现 Solution 工具栏。

2）选择 Solution 工具栏中的“Deformation”→“Directional”，此时在树结构图中会出

现“Directional Deformation”对象。

3）设置 Directional Deformation 对象的细节窗口中“Orientation”为“Y Axis”。

4）在 Outline 树结构图中的“Directional Deformation”对象上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的 *Y* 向变形云图如图 26-29 所示。在得到的细节窗口中，单击“Maximum Value Over Time”→“Maximum”前的框，使其出现“P”字，代表将其设置为参数，如图 26-30 所示。

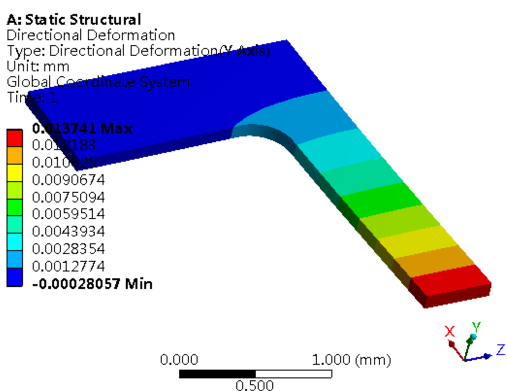
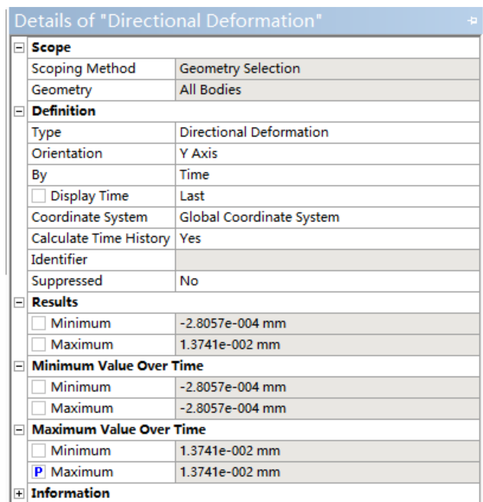


图 26-29 *Y* 向变形云图



Details of "Directional Deformation"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Directional Deformation
Orientation	Y Axis
By	Time
Display Time	Last
Coordinate System	Global Coordinate System
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	-2.8057e-004 mm
Maximum	1.3741e-002 mm
Minimum Value Over Time	
Minimum	-2.8057e-004 mm
Maximum	-2.8057e-004 mm
Maximum Value Over Time	
Minimum	1.3741e-002 mm
P Maximum	1.3741e-002 mm
Information	

图 26-30 添加变形量为参数

5）选择 Solution 工具栏中的“Stress”→“Equivalent（von-Mises）”，此时在树结构图中会出现“Equivalent Stress”选项。

6）选择视图区域的零件，然后单击 Details of“Equivalent Stress”细节窗口中“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体等效应力的等值线云图。

7）在 Outline 树结构图中的“Equivalent Stress”上右击，然后在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解。求解后得到的等效应力云图如图 26-31 所示。

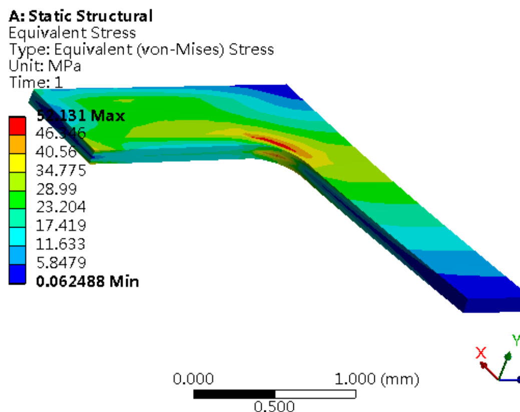


图 26-31 等效应力云图

8）选择 Solution 工具栏中的“Tools”→“Stress Tool”，如图 26-32 所示，此时在树结构图中将出现“Stress Tool”对象。

9）在“Stress Tool”对象上右击，然后选择“Insert”→“Stress Tool”→“Safety Factor”，如图 26-33 所示。此时在树结构图中将出现“Safety Factor”对象。



图 26-32　添加应力工具

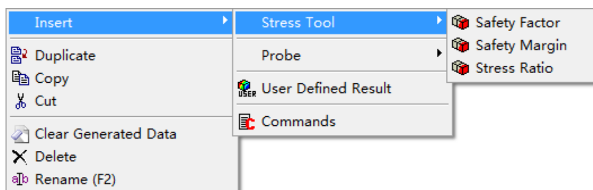


图 26-33　添加应力系数图

10）选择视图区域的零件，然后单击 Safety Factor 对象细节窗口中的“Geometry”选项下的“Apply”按钮，此时添加整体安全系数等值线云图。

11）在 Outline 树结构图中的“Safety Factor”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Evaluate All Results”，此时进行求解，求解后得到的安全系数云图如图 26-34 所示。在得到的细节窗口中，单击“Results”→“Minimum”前的框，使其出现“P”字，代表将其设置为参数，如图 26-35 所示。

9. 退出 Mechanical

单击 Mechanical 界面右上角的“关闭”按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的 Static Structural 分析项目均已完成。

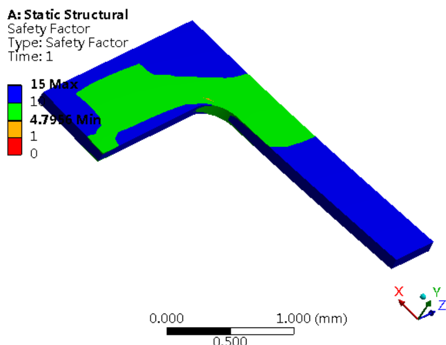


图 26-34　安全系数云图

Details of "Safety Factor"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Safety Factor
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
P Minimum	4.7956
Minimum Occurs On	Solid
Information	

图 26-35　添加安全系数为参数

26.2.2　响应面

1. 添加 DX 系统

1）双击 Toolbox 中的“Design Exploration”→“Response Surface”，添加 Response Surface（B）系统。

2）双击 Toolbox 中的“Design Exploration”→“Direct Optimization”，添加 Direct Optimization（C）系统。

3）双击 Toolbox 中的“Design Exploration”→“Six Sigma Analysis”，添加 Six Sigma

Analysis（D）系统。

2. 实验设计计算

1）双击“Response Surface（B）”中的“Design of Experiments（DOE）”项，打开其工作界面（Outline of Schematic B2: Design of Experiments 窗口）。

2）在 Outline of Schematic B2: Design of Experiments 中，选择 3 个输入参数。

3）在 Outline of Schematic B2: Design of Experiments 中的“Charts”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert Parameters Parallel”。

4）在 Outline of Schematic B2: Design of Experiments 中的“Charts”上右击，在弹出的快捷菜单中选择“Insert Design Points vs Parameter”。

5）设置 Outline of Schematic B2: Design of Experiments，如图 26-36 所示，单击“Update”按钮，可以进行实验设计计算，得到的结果如图 26-37 所示。

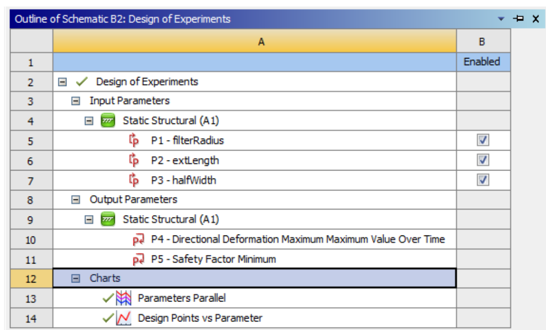


图 26-36 实验设计概览

Table of Schematic B2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto Defined)

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - filterRadius (mm)	P2 - extLength (mm)	P3 - halfWidth (mm)	P4 - Directional Deformation Maximum Maximum Value Over Time (mm)	P5 - Safety Factor Minimum
2	1 (DP 0)	0.25	2	0.5	0.013741	4.7956
3	2	0.225	2	0.5	0.013835	4.8774
4	3	0.275	2	0.5	0.013645	4.955
5	4	0.25	1.8	0.5	0.011066	5.1671
6	5	0.25	2.2	0.5	0.016822	4.4389
7	6	0.25	2	0.45	0.01458	4.5578
8	7	0.25	2	0.55	0.013005	4.9073
9	8	0.22967	1.8374	0.45935	0.012157	4.871
10	9	0.27033	1.8374	0.45935	0.012014	5.1242
11	10	0.22967	2.1626	0.45935	0.017131	4.2326
12	11	0.27033	2.1626	0.45935	0.016943	4.4665
13	12	0.22967	1.8374	0.54065	0.011101	5.2086
14	13	0.27033	1.8374	0.54065	0.010977	5.5132
15	14	0.22967	2.1626	0.54065	0.015568	4.5514
16	15	0.27033	2.1626	0.54065	0.015401	4.7797

图 26-37 实验设计结果

6）关闭 Outline of Schematic B2: Design of Experiments 窗口。

3. 响应面计算

1）双击“Response Surface（B）”中的“Response Surface”项，打开其工作界面（Outline of Schematic B3: Response Surface 窗口）。

2）在 Outline of Schematic B3: Response Surface 中，选择 3 个输入参数。

3）单击“Update”按钮，进行响应面计算。



4）单击 Outline of Schematic B3: Response Surface 的第 17 行，可以查看设计空间图，如图 26-38 所示（注意该图仅是部分结果）。

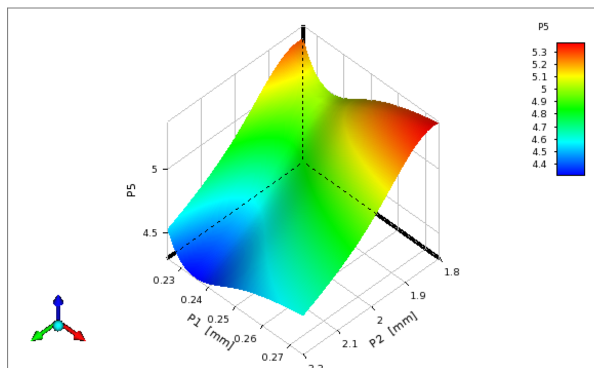


图 26-38　设计空间图

5）单击 Outline of Schematic B3: Response Surface 的第 18 行，可以查看局部敏感度图，如图 26-39 所示（注意该图仅是部分结果）。

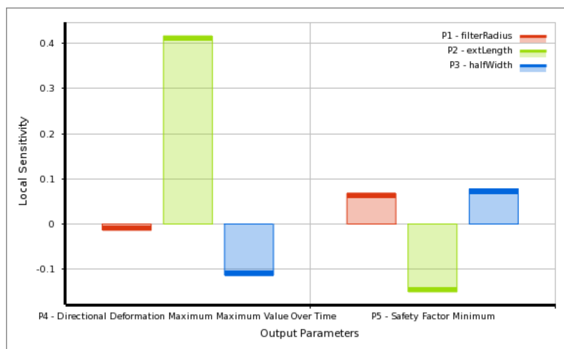


图 26-39　局部敏感度图

6）单击 Outline of Schematic B3: Response Surface 的第 19 行，可以查看局部敏感度曲线图，如图 26-40 所示（注意该图仅是部分结果）。

7）单击 Outline of Schematic B3: Response Surface 的第 20 行，可以查看蛛网图，如图 26-41 所示（注意该图仅是部分结果）。

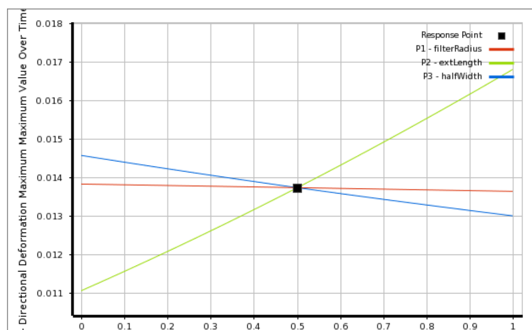


图 26-40　局部敏感度曲线图

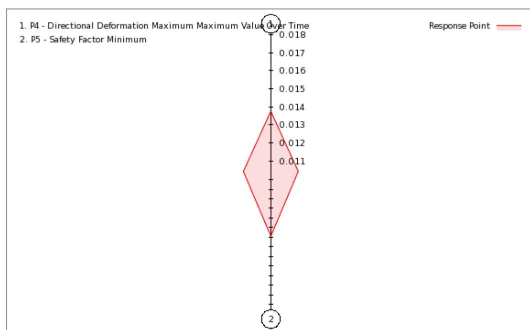


图 26-41　蛛网图

8）完成计算后的 Outline of Schematic B3: Response Surface 窗口如图 26-42 所示。关闭 Outline of Schematic B3: Response Surface 窗口。

Outline of Schematic B3: Response Surface

	A	B
1		Enabled
2	⊟ ✓ Response Surface	
3	⊟ Input Parameters	
4	⊟ Static Structural (A1)	
5	P1 - filterRadius	☑
6	P2 - extLength	☑
7	P3 - halfWidth	☑
8	⊟ Output Parameters	
9	⊟ Static Structural (A1)	
10	P4 - Directional Deformation Maximum Maximum Value Over Time	
11	P5 - Safety Factor Minimum	
12	✓ Min-Max Search	☑
13	⊟ Metrics	
14	✓ Goodness Of Fit	
15	⊟ Response Points	
16	⊟ ✓ Response Point	
17	✓ Response	
18	✓ Local Sensitivity	
19	✓ Local Sensitivity Curves	
20	✓ Spider	
*	New Response Point	

图 26-42 完成响应面计算后的工作界面

26.2.3 直接优化

1）双击 Direct Optimization 中的“Optimization”项，进入 C2: Optimization 工作界面。

2）单击 Outline of Schematic C2: Optimization 中的“Objectives and Constraints”项，然后在 Table of Schematic C2: Optimization 中设置如图 26-43 所示的参数。

Table of Schematic C2: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	P5 >= 4	P5 - Safety Factor Minimum	No Objective		Values >= Lower Bound	4	
4	P4 >= 0.017 mm	P4 - Directional Deformation Maximum Maximum Value Over Time	No Objective		Values >= Lower Bound	0.017	
*		Select a Parameter					

图 26-43 设置目标参数

3）单击“Update”按钮，进行优化计算。

4）此时生成 100 个计算点，计算完成后，得到的候选点可通过后面的操作查看。得到的符合要求的点列表如图 26-44 所示。计算完成后的工作界面如图 26-45 所示。

Table of Schematic C2: Optimization , Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Reference	Name	P1 - filterRadius (mm)	P2 - extLength (mm)	P3 - halfWidth (mm)	P4 - Directional Deformation Maximum Maximum Value Over Time (mm)		P5 - Safety Factor Minimum	
2						Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Candidate Point 1	0.23275	2.177	0.47643	0.017001	-3.58%	4.2704	-5.87%
4	◉	Candidate Point 2	0.25675	2.1958	0.45667	0.017631	0.00%	4.5366	0.00%
*		New Custom Candidate Point	0.25	2	0.5				

图 26-44 符合要求的点列表

Outline of Schematic C2: Optimization

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
2	⊟ Optimization		
3	⊟ Objectives and Constraints		
4	P5 >= 4		
5	P4 >= 0.017 mm		
6	⊟ Domain		
7	⊟ Static Structural (A1)		
8	P1 - filterRadius	☑	
9	P2 - extLength	☑	
10	P3 - halfWidth	☑	
11	Parameter Relationships		
12	✓ Raw Optimization Data		
13	⊟ Results		
14	✓ Candidate Points		
15	✓ Tradeoff		
16	✓ Samples		
17	✓ Sensitivities		

图 26-45　计算完成后的工作界面

5）在 Outline of Schematic C2: Optimization 中，单击 14 行可以查看候选点的参数情况，如图 26-46 所示。

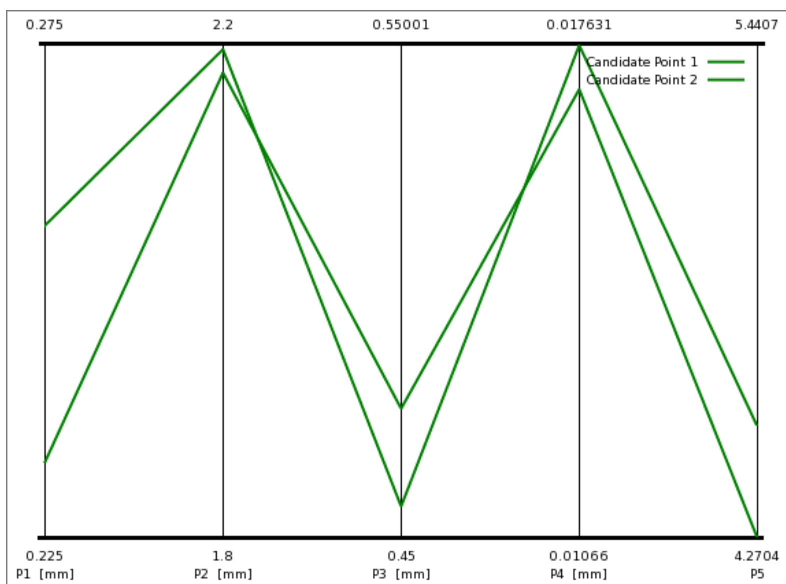


图 26-46　候选点图

6）在 Outline of Schematic C2: Optimization 中，单击 15 行可以查看权衡图，如图 26-47 所示。

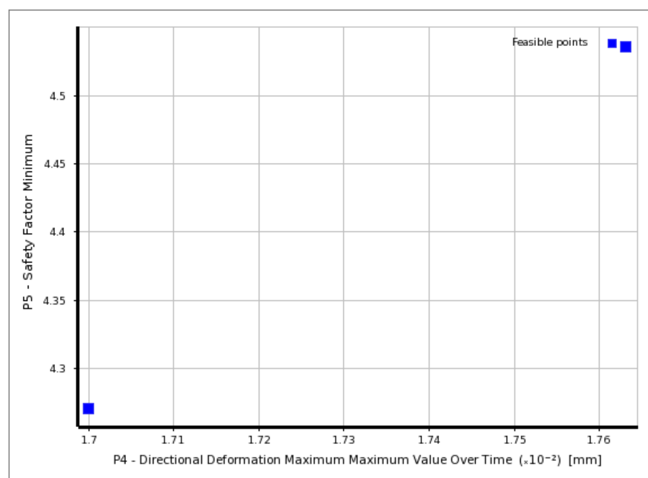


图 26-47 权衡图

7）在 Outline of Schematic C2: Optimization 中，单击 16 行可以查看样本图，如图 26-48 所示。

8）在 Outline of Schematic C2: Optimization 中，单击 17 行可以查看敏感度图，如图 26-49 所示。

9）关闭 Outline of Schematic C2: Optimization 窗口。

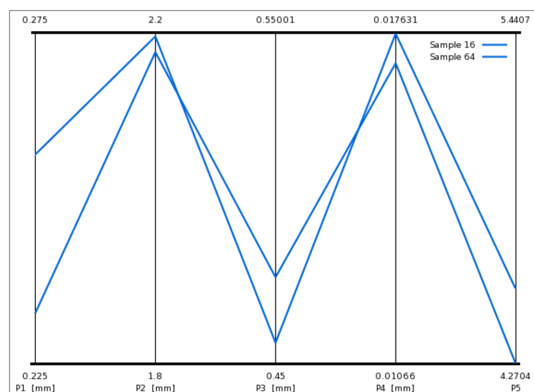


图 26-48 样本图

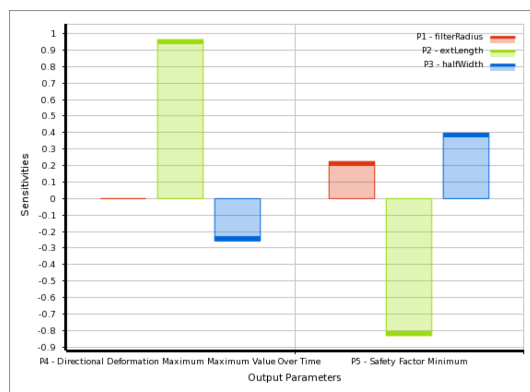


图 26-49 敏感度图

26.2.4 SSA 分析

1）参考 25.2.2 完成 Design of Experiments（SSA）项。

2）参考 25.2.2 完成 Response Surface（SSA）项。

3）双击 Outline of Schematic D4 中的“Six Sigma Analysis”，进入分析工作界面。

4）单击“Update”按钮进行计算。计算完成后的 Outline of Schematic D4: Six Sigma Analysis 如图 26-50 所示。

Outline of Schematic D4: Six Sigma Analysis	A	B
1		Enabled
2	Six Sigma Analysis	
3	Input Parameters	
4	Static Structural (A1)	
5	P1 - filterRadius	☑
6	P2 - extLength	☑
7	P3 - halfWidth	☑
8	Output Parameters	
9	Static Structural (A1)	
10	P4 - Directional Deformation Maximum Maximum Value Over Time	
11	P5 - Safety Factor Minimum	
12	Charts	
13	Sensitivities	

图 26-50　完成计算后的界面

5）单击 Outline of Schematic D4: Six Sigma Analysis 的第 10 行，可以查看最大变形的概率分布，如图 26-51 所示。

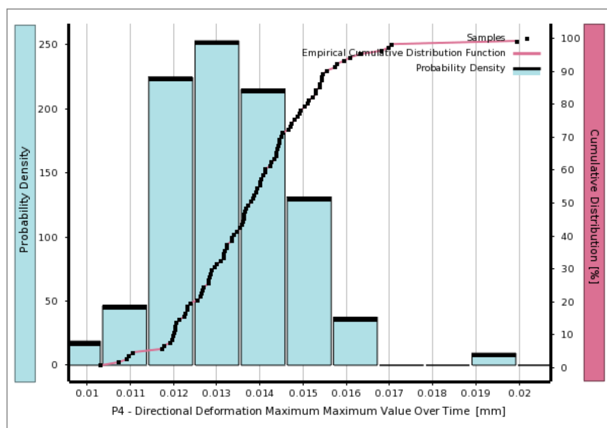


图 26-51　最大变形的概率分布

6）单击 Outline of Schematic D4: Six Sigma Analysis 的第 11 行，可以查看最小安全系数的概率分布，如图 26-52 所示。

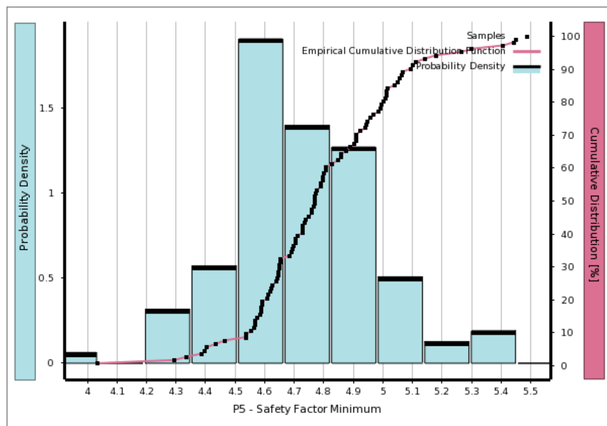


图 26-52　最小安全系数的概率分布

7）关闭 Outline of Schematic D4: Six Sigma Analysis。

8）在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的“保存”按钮，保存包含有分析结果的文件。

9）单击右上角的“关闭”按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析，如图 26-53 所示。

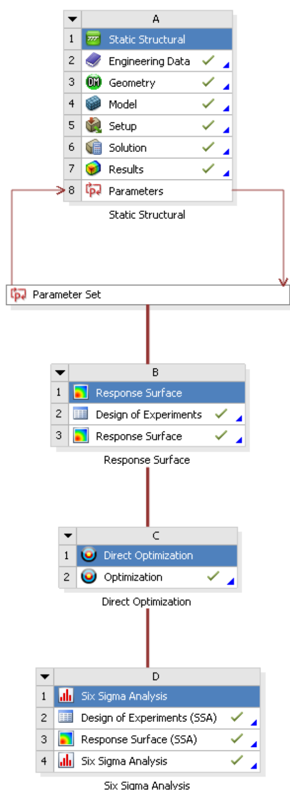


图 26-53 完成的分析项目

26.3 本章小结

本章介绍了 ANSYS Workbench 的优化设计模块，重点介绍了 Design Exploration 的各项应用，包括实验设计、相关参数、响应面、目标驱动优化、六西格玛分析等。通过本章的学习，读者可以了解在 Workbench 下进行优化设计的基础知识。本章未涉及相关的理论知识，如需了解，可参考帮助文档。

参 考 文 献

[1] 黄志新，刘成柱. ANSYS Workbench 14.0 超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2013.
[2] 张洪才，刘宪伟，孙长青，等. ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
[3] 吕建国，康士廷. ANSYS Workbench 14 有限元分析自学手册[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
[4] 凌桂龙，丁金滨，温正. ANSYS WorkBench 13.0 从入门到精通[M]. 北京：清华大学出版社，2012.
[5] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012.
[6] 李兵. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]. 2 版. 北京：清华大学出版社，2012.
[7] 买买提明・艾尼. ANSYS Workbench 14.0 仿真技术与工程实践[M]. 北京：清华大学出版社，2013.
[8] 浦广益． ANSYS Workbench 基础教程与实例详解[M]. 2 版. 北京：中国水利水电出版社，2014.

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通 第2版

ANSYS系列已出版

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

- ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通 第2版
- ANSYS 18.0有限元分析学习宝典
- ANSYS 17.0有限元分析完全自学手册 第2版
- ANSYS Workbench 17.0 结构仿真分析从入门到精通
- ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练
- ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 16.1结构分析工程应用实例解析 第4版
- ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通
- ANSYS 15.0 有限元分析完全自学手册
- ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS FLUENT 14.0仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0 联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0 从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版



机械工业出版社计算机分社官方微信

关注计算机分社官方微信，回复**57712**即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信公众号


机工IT互联网工厂微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-57712-6
策划编辑◎张淑谦
封面设计◎



51CTO.com
技术成就梦想

ISBN 978-7-111-57712-6



定价：85.00元